www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Jaargang 19, 1957, no. 6 blz. 185-216 Verschenen 19 september 1957

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUKTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

EEN EENVOUDIG TOESTEL VOOR CONTACTMICRORADIOGRAFIE TUSSEN 1,5 EN 5 kV

door B. COMBÉE en A. RECOURT.

778.33:621.386.1

De microradiografie, het maken van röntgenfoto's van microscopische preparaten, kan belangrijke — met een lichtmicroscoop niet te verkrijgen — informatie verschaffen. Het is in principe reeds een vrij oude techniek, maar deze kon tot nu toe door zijn gecompliceerdheid niet op grote schaal in ziekenhuizen en biologische laboratoria worden toegepast. Met het verschijnen van het apparaat voor contactmicroradiografie CMR 5, hetwelk is uitgerust met een afgesmolten röntgenbuisje met een berylliumvenster van slechts 50 micron dik, is de microradiografie binnen het bereik gekomen van iedere bioloog of medicus; zelfs routinewerk blijkt thans tot de mogelijkheden te behoren. In het hier volgende artikel wordt het nieuwe apparaat besproken, na een algemene inleiding over de microradiografie. Het blijkt dat het scheidend vermogen, hetwelk thans bepaald wordt door de film, 0,5 à 1 micron bedraagt en dus niet ver achterblijft bij wat men met een lichtmicroscoop kan bereiken (ca. 0,3 micron).

Inleiding

Onder de methodes voor microscopisch onderzoek begint de microradiografie thans snel in betekenis toe te nemen en zich naast de licht- en de elektronenmicroscopie een belangrijke plaats te veroveren. Men maakt hierbij een röntgenfoto en men bekijkt of fotografeert deze foto met behulp van een loep of een microscoop. Het beeld wordt op de „normale" wijze verkregen door schaduwprojectie; het gaat hier dus niet, zoals men een ogenblik zou kunnen denken, om microscopie met röntgenstralen [1]). Op het punt van scheidend vermogen biedt de methode dus niet de voordelen die een echte röntgenmicroscoop door de kleine golflengte van het „röntgenlicht" zou kunnen opleveren [2]). Dat de microradiografie desondanks van grote betekenis is, vindt zijn oorzaak in de eerste plaats in het feit dat röntgenstralen objecten kunnen doordringen die voor licht- en elektronenstralen niet transparant zijn. Bovendien is het mogelijk om, via onze kennis van de absorptie van röntgenstralen door materie, uit het radiogram nog méér dan alleen de geometrie van het object te leren kennen, nl. óók iets van zijn chemische samenstelling te weten te komen: het is mogelijk gebleken van histologische en cytologische [3]) structuren het gewicht te bepalen en kwantitatieve chemische analyses uit te voeren. Ten slotte kan men, naar analogie van het kleuren van preparaten voor lichtmicroscopisch onderzoek, hier werken met röntgencontrastmiddelen, die weer andere mogelijkheden bieden dan de kleurstoffen.

[1]) Alhoewel er ook op dit gebied de laatste tien jaren vorderingen gemaakt zijn, hebben de pogingen om een röntgenmicroscoop te bouwen tot nu toe niet tot instrumenten geleid die de lichtmicroscoop op het punt van het scheidend vermogen overtreffen. Ten aanzien van vergroting en gezichtsveld blijven deze experimentele instrumenten ver achter bij de lichtmicroscoop. Zie P. Kirkpatrick en A. V. Baez, J. Opt. Soc. Amer. **38**, 766-774, 1948 en P. Kirkpatrick en H. H. Pattee jr., Advances biol. med. Phys. **3**, 247-283, 1953.
Zie verder in dit verband over röntgenoptiek: Y. Cauchois, Rev. Opt. **29**, 151-163, 1950 en M. Montel, Rev. Opt. **32**, 585-600, 1953; Optica Acta **1**, 117-126, 1954; C. R. Acad. Sci. Paris **239**, 39-41, 1954.

[2]) Een behandeling van het scheidend vermogen van microscopen in afhankelijkheid o.m. van de golflengte van het gebruikte licht vindt men bij J. B. le Poole, Philips techn. T. **9**, 33-46, 1947.

[3]) De histologie is de leer der weefsels; de cytologie is de leer der cellen. De cellen zijn de bouwstenen van de weefsels.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Alvorens het in de titel genoemde apparaat en alles wat met het gebruik ervan samenhangt te bespreken, zullen we nagaan volgens welke wetten de absorptie van röntgenstraling plaatsvindt en op welke wijzen men een schaduwbeeld op de film kan projecteren.

De absorptie van röntgenstraling; contrast

De verzwakking die een evenwijdige monochromatische röntgenbundel in materie ondergaat, wordt beschreven door de formule:

$$I = I_0 \, e^{-\mu d} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Hierin is I_0 de beginintensiteit, I de intensiteit wanneer een laag materie ter dikte d gepasseerd is, en μ de absorptiecoëfficiënt. De wijze waarop μ varieert met de golflengte λ van de straling en met het atoomnummer Z van de elementen waaruit de absorberende materie bestaat, wordt voor een groot golflengtegebied gegeven door de formule:

$$\mu = C \, \lambda^3 \, Z^4, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

waarin C een constante is.

De afhankelijkheid van λ ziet men gedemonstreerd in *fig. 1a*, waar is aangegeven hoe sterk een röntgenbundel verzwakt wordt door een laagje van resp. 10 micron dierlijk weefsel, 1 cm lucht en 50 micron beryllium; bij een golflengte van 2 Å zijn deze laagjes bijna geheel transparant, bij 15 Å absorberen ze nagenoeg alle straling. De ligging van de curven *2* en *3* van deze figuur doet iets blijken van de zeer sterke invloed van Z. De waarde van Z voor beryllium is 4; voor lucht moet men rekenen met een effectieve waarde die tussen 7 (stikstof) en 8 (zuurstof) ligt. Denkt men zich de luchtlaag samengeperst tot de dichtheid van beryllium, dan is hij slechts 7 micron dik. Ondanks deze geringe dikte absorbeert dit luchtlaagje sterker dan het zeven maal zo dikke berylliumfoelie.

Niet altijd vertoont de kromme die de absorptie (c.q. doorlating) als functie van de golflengte weergeeft, het continue verloop van de curven van fig. 1*a*. In fig. 1*b* ziet men, voor hetzelfde golflengtegebied, de absorptie in een laagje van een fotografische emulsie van 5 micron dik. De curve vertoont bij 3,7 en bij 7,0 Å een sprong. Deze zg. absorptiekanten liggen bij golflengten die voor ieder element karakteristiek zijn en worden hier veroorzaakt door het zilver en het broom.

Bij de golflengten waarmee men hier te maken heeft, is voor de verzwakking van de röntgenbundel in hoofdzaak het fotoelektrisch effect verantwoordelijk. Bij grote λ kunnen uit de

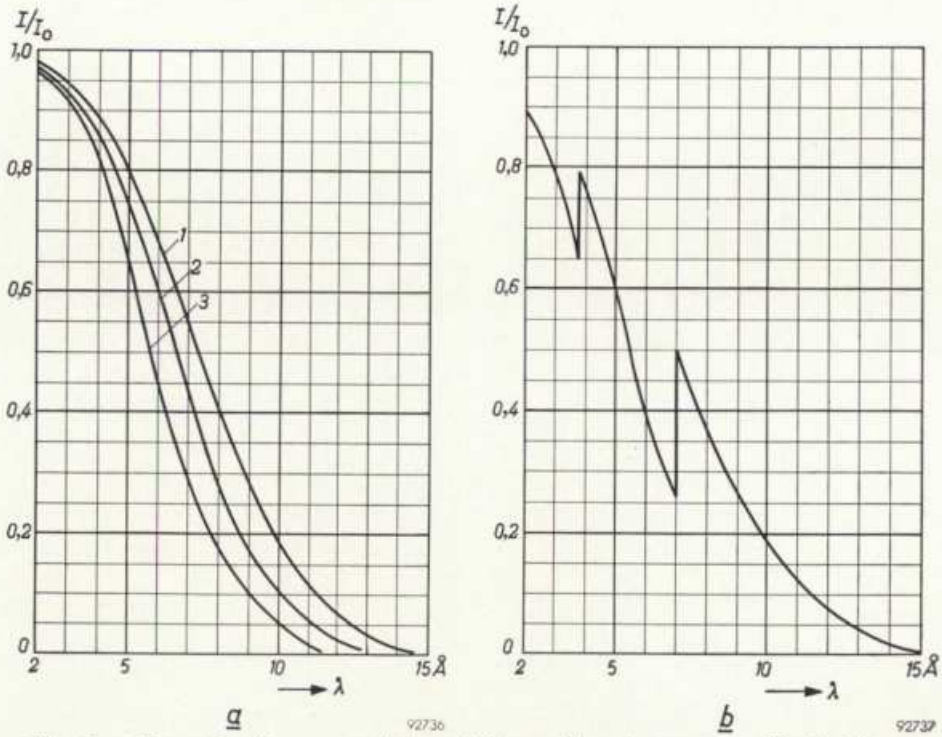


Fig. 1. *a*) De verhouding tussen de intensiteit van doorgelaten en opvallende röntgenstraling als functie van de golflengte, voor drie verschillende absorberende laagjes: *1* dierlijk weefsel ter dikte van 10 micron, *2* luchtlaag van 1 cm, en *3* berylliumfoelie van 50 micron.
b) Idem voor een emulsielaagje van „Kodak Maximum Resolution" film ter dikte van 5 micron. De sprongen in de curve zijn de L-absorptiekanten van broom (links) en zilver (rechts).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

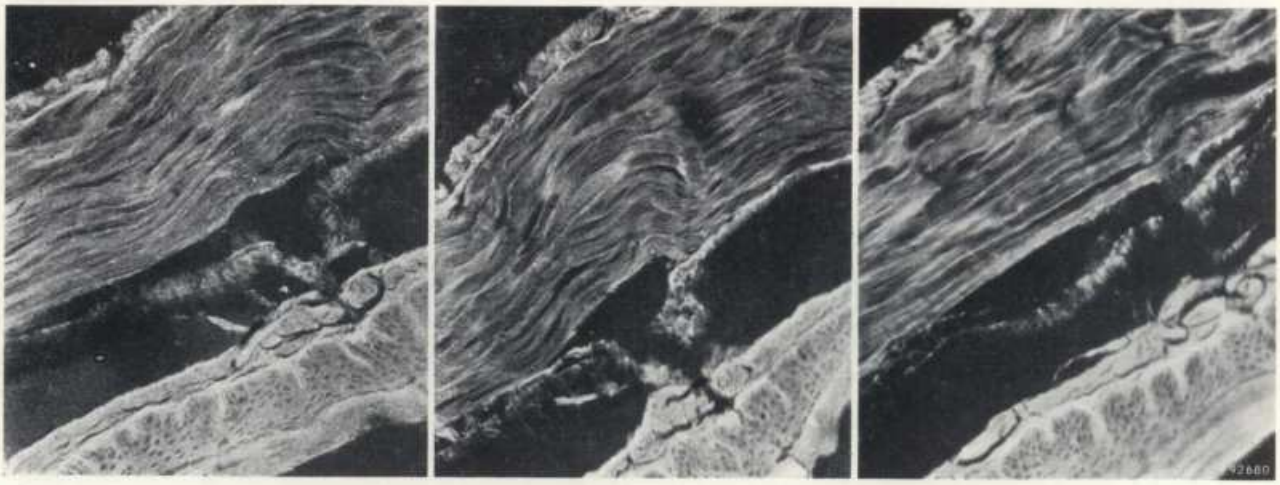


Fig. 2. Deel van de slokdarm van de cavia. Het lichte gedeelte is de mucosa (een klierlaag), die aan de binnenzijde van de darmwand ligt. De opnamen zijn, van links naar rechts, gemaakt bij anodespanningen van resp. 5, 3 en 1,5 kV op „Kodak Spectroscopic Film" 649-0. Naarmate men een lagere anodespanning kiest, neemt het contrast van de opnamen toe. Vergroting 130×.

elektronenwolk van een atoom van het absorberende medium alleen elektronen uit de buitenste schil(len) worden losgemaakt. Neemt λ echter af (d.w.z. neemt de energie der röntgenquanta toe) tot de grens waarbij elektronen uit een volgende, dieper gelegen, schil kunnen worden losgemaakt, dan wordt de absorptie plotseling groter. Deze sprongen in de absorptiecurven zijn de bovenvermelde absorptiekanten. Men benoemt ze met dezelfde letter als de desbetreffende elektronenschil in het atoom (van binnen uit gerekend resp. K, L, M, enz.). In de curve van fig. 1*b* ziet men de L-absorptiekanten van broom en zilver. De absorptiekanten van de elementen waaruit de stoffen van fig. 1*a* bestaan, liggen bij golflengten die groter dan 15 Å zijn.

De curve van fig. 1*b* toont opnieuw hoezeer de absorptie met het atoomnummer toeneemt. Hoewel de emulsielaag slechts 5 micron dik is en slechts voor een klein volumedeel uit AgBr bestaat, is toch, door de grote bijdrage van Ag en Br, de absorptie ervan ongeveer even sterk als die van de laagjes van fig. 1*a*, en beneden 3,7 Å zelfs veel sterker.

Is enerzijds het grote doordringingsvermogen van röntgenstraling een der fundamenten van de methode, anderzijds moeten natuurlijk de verschillende delen van een object een onderling duidelijk verschillende doorlating vertonen, d.w.z. de stralen moeten op sommige plaatsen behoorlijk verzwakt worden. Gezien de geringe dikte der preparaten (10-100 micron), betekent dit dat μ een hoge waarde moet hebben. Uit verg. (2) blijkt direct dat men daartoe zachte röntgenstraling dient te gebruiken. Men moet de winst aan contrast, die men zo verkrijgt, natuurlijk betalen met een langere belichtingstijd.

Men kan afleiden dat op de film het contrast tussen twee delen van een object met slechts weinig verschillende waarde van μ zo groot mogelijk is wanneer men zorgt dat het produkt μd ongeveer gelijk één is [4]). Werkt men met een coupe van 20 micron, d.w.z. van 2×10^{-3} cm, dan moet μ dus ongeveer 500 cm^{-1} zijn om aan deze voorwaarde te voldoen. Voor zacht, dierlijk weefsel, dat b.v. voor 25% uit droge substantie bestaat, is dit het geval wanneer $\lambda = 11$ Å is; voor hard weefsel (bot) is de gunstigste golflengte bij dezelfde preparaatdikte 3 à 4 maal kleiner. Men kan gelukkig echter vrij ver van deze optimale condities afwijken zonder dat het contrast ernstig achteruit gaat. *Fig. 2* toont opnamen van dwarscoupes van de slokdarm van een cavia (guinees biggetje), waaraan men ziet hoe het contrast toeneemt naarmate langgolviger röntgenstraling gebruikt wordt.

Projectie- en contactmicroradiografie

Bij het maken van een röntgenfoto heeft men twee mogelijkheden: men kan object en film met elkaar in contact brengen, maar óók is het mogelijk de film op enige afstand achter het object op te stellen (projectie-opname [5])). In het eerste geval verkrijgt men een zo scherp mogelijke afbeelding; in het tweede geval heeft men in de röntgenfoto al een zekere vergroting, want het schaduwbeeld is groter dan het object, maar men heeft nu het nadeel van het optreden van een halfschaduw („geometrische onscherpte"), waarvan de breedte toeneemt met de

[4]) A. Engström en R. C. Greulich, J. appl. Phys. **27**, 758-759, 1956 (no. 7).

[5]) Zie hiervoor o.a. M. von Ardenne, Elektronen-Übermikroskopie, Springer, Berlijn 1940, blz. 72, en V. E. Cosslett en W. C. Nixon, Proc. Roy. Soc. **B 140**, 422-431, 1952.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

afstand van object tot film. *Fig. 3* brengt een en ander schematisch in beeld. Men kan uit de figuur afleiden dat voor de geometrische onscherpte O_g geldt:

$$O_g = \frac{f\,b}{a-b}. \quad \ldots\ldots \quad (3a)$$

Hierin is f de grootte van het focus van de röntgenbuis en zijn a en b resp. de afstanden focus-film en object-film. Door de vergroting V in te voeren, die gelijk is aan $a/(a-b)$, kan men dit herleiden tot

$$O_g = (V-1)f. \quad \ldots\ldots \quad (3b)$$

In geval van contact tussen object en film wordt O_g zeer klein, omdat dan $b \approx 0$ ofwel $V \approx 1$ is.

Ten einde een indruk te krijgen van het scheidend vermogen, dient O_g vergeleken te worden met de lineaire afmetingen van het beeld. Dit betekent dat men de lineaire afmeting van het object moet vergelijken met O_g/V. We vinden dan met behulp van formule (3b) voor het scheidend vermogen:

$$\frac{O_g}{V} = \frac{V-1}{V} f. \quad \ldots\ldots \quad (4)$$

Dit is dus de kleinste afstand die twee objectdetails kunnen hebben zonder dat hun halfschaduwen elkaar overlappen, c.q. de kleinste afmeting die een detail mag hebben opdat zijn kernschaduw nog tot de film reikt. De vorm (4) wordt zeer klein wanneer V tot 1 nadert. Bij grote V wordt het scheidend vermogen praktisch gelijk aan de afmeting van het focus [6]).

Ter demonstratie een numeriek voorbeeld. Bij een dikte van het object van 10 micron, en van de gevoelige laag van 5 micron, is b (formule 3a) in geval van contact dus ten hoogste 15 micron. Kiest men een afstand focus-film van 15 mm en heeft men een focus van 0,3 mm (300 micron), dan volgt uit formule (3a) dat O_g ten hoogste 0,3 micron is. Maakt men echter, onder overigens gelijke omstandigheden, een projectie-opname met $b = 7{,}5$ mm, dan wordt $O_g = 300$ micron en, daar $V = 2$ is, de kleinste afstand in het object die gescheiden gezien kan worden 150 micron.

Toch mag uit het bovenstaande niet geconcludeerd worden dat men met contactmicroradiografie altijd een beter scheidend vermogen bereikt dan met projectiemicroradiografie. We hebben nl. tot nu toe

[6]) De naam „scheidend vermogen" wordt dus hier — zoals in de microscopie gewoonte is — gebruikt voor de kleinste afstand waarop twee objecten of objectdetails van elkaar verwijderd moeten zijn ten einde gescheiden waargenomen te kunnen worden. Wanneer men echter spreekt van het scheidend vermogen van een apparaat waarmee de grootheid x gemeten wordt, bedoelt men in de regel de breuk $x/\Delta x$, waarin Δx het kleinste aantoonbare verschil tussen twee x-waarden is en dus overeenkomt met wat hierboven scheidend vermogen heette. We zullen ons in dit artikel aan de conventie der microscopisten houden.

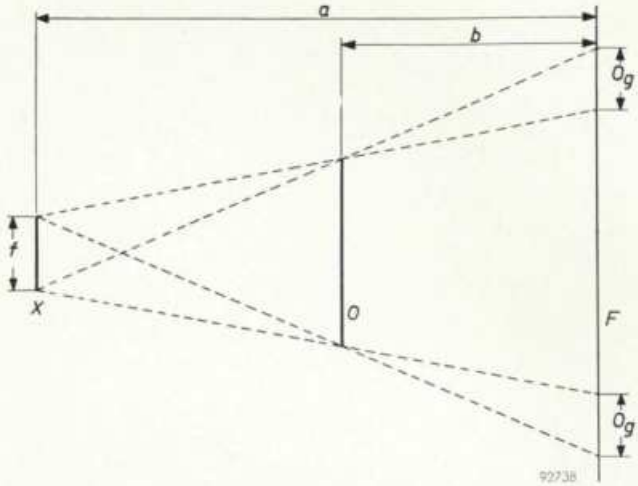


Fig. 3. De geometrische onscherpte O_g van een microradiogram wordt bepaald door de afmetingen van het focus (X) en door de afstanden van film (F) tot focus en van film tot object (O). Indien laatstgenoemde afstand zeer klein is (contactmethode), is O_g eveneens zeer klein.

niet de eigenschappen van de film in aanmerking genomen. Door het feit dat de gevoelige laag geen continuüm is maar een suspensie van de lichtgevoelige AgBr-korrels in gelatine, heeft de film zelf een beperkt scheidend vermogen. Zij K de kleinste afstand die de film dientengevolge scheiden kan, dan is het duidelijk dat we niet meer kunnen winnen wanneer $f(V-1)/V$ kleiner dan K geworden is. Indien men nu beschikt over een zeer fijn focus, bereikt men deze grens bij een vergroting die aanmerkelijk groter dan 1 is. De afstand in het object die gescheiden kan worden en welke K/V is, is hier dus kleiner dan K, de grenswaarde bij contactmicroradiografie. Wanneer b.v. $f = K$ is, wordt de gunstigste vergroting $V = 2$ en is de kleinste te scheiden afstand dus $K/2$.

De instrumentele complicaties die het werken met een dergelijk fijn focus meebrengt, en de vrij geringe intensiteit van een dergelijke röntgenbron maken dat voor vele doeleinden toch de contactmethode de voorkeur verdient. Dit zal des te meer zo zijn, naarmate men films met kleinere K zal kunnen maken. Bovendien ligt de minimale buisspanning bij projectiemicroradiografie aanzienlijk hoger, omdat men daarbij met een transmissietreffplaat moet werken [5]). We zullen ons in het volgende dan ook verder alleen met de contactmicroradiografie bezig houden.

Het apparaat voor contactmicroradiografie CMR 5

Het gebruik van zachte röntgenstralen maakte tot voor kort dat ook voor de contactmicroradiografie de techniek nog niet zo heel eenvoudig was. Het was nl. niet mogelijk afgesmolten röntgenbuizen te maken met vensters die de gewenste

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

straling voldoende doorlaten. Voldoend dunne foelies van lichte metalen zoals beryllium en aluminium waren niet vacuümdicht, zodat men voortdurend moest pompen.

Het is de laatste jaren echter gelukt vensters te maken van berylliumfoelie ter dikte van 50 micron die wèl vacuümdicht zijn. Dank zij het lage atoomnummer van beryllium (4) is de absorptie van deze vensters zo klein dat men een röntgenbuis voor microradiografie daarmee kan uitrusten (vgl. fig. 1*a*, curve 3). *Fig. 4* toont een dergelijke buis, die geschikt is voor anodespanningen van 1,5 tot 5 kV. *Fig. 5* laat een doorsnede ervan zien. De afmetingen van het focus zijn $0{,}3 \times 0{,}3$ mm, terwijl de afstand focus-venster 11 mm bedraagt. Het fijne focus wordt verkregen door elektrostatische focussering van de elektronen, en wel door gebruik te maken van de katodeconstructie die reeds enige tijd in de zg. fijnfocusbuizen voor de medische diagnostiek wordt toegepast [7]).

Fig. 6 toont een foto van het apparaat CMR 5 waarvan de beschreven röntgenbuis deel uitmaakt. De röntgenbuis bevindt zich in het uitstekende gedeelte rechts en is zo geplaatst dat het venster zich aan de onderzijde bevindt.

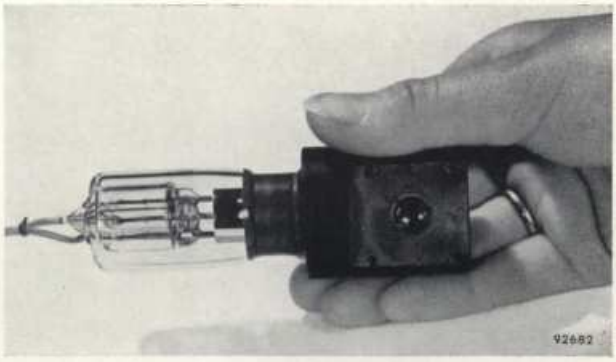


Fig. 4. Röntgenbuis voor microradiografie tussen 1,5 en 5 kV.

nadat men alles op de gewenste waarden heeft ingesteld, worden uitgeschakeld (b.v. voor het laden en aanbrengen van de camera) zonder dat de gloeistroom mede wordt uitgeschakeld. Wèl wordt deze bij afwezigheid van anodespanning automatisch wat verlaagd terwille van een langere levensduur van de buis. Op deze wijze wordt na het inschakelen van de anodespanning de evenwichtstoestand weer snel bereikt en behoeft men bij het kiezen van de belichtingstijd meestal geen rekening te houden met het opwarmeffect.

De camera bevindt zich in het verticale cilin-

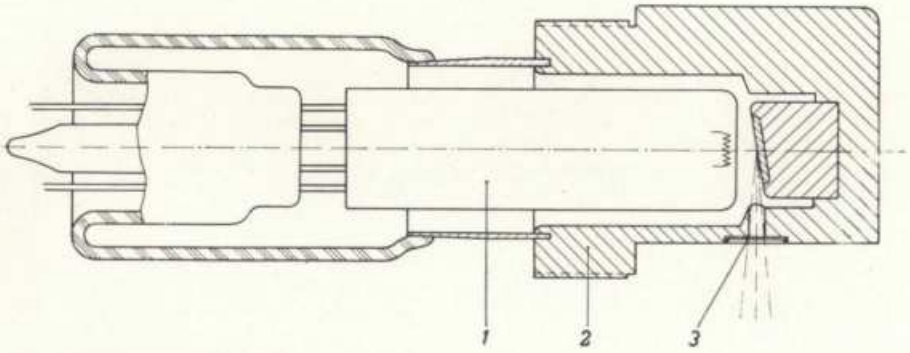


Fig. 5. Doorsnede van de buis van fig. 4. *1* katode met gloeidraad van wolfraam; *2* anode met trefplaat van wolfraam; *3* venster van beryllium, dikte 50 micron. De buis is 8 cm lang. De (schijnbare) afmetingen van het focus zijn 0,3 bij 0,3 mm.

De elektrische schakeling die nodig is voor de voeding van de buis, bevindt zich in de kast. Deze schakeling is zo ingericht dat de anodespanning van de buis continu kan worden gevarieerd. Verder is het mogelijk de buisstroom te regelen, zodat men kan zorgen dat het vermogen niet groter wordt dan het röntgenbuisje kan verdragen (10 W). De gloeistroom is gestabiliseerd door gebruik te maken van een stroomstabiliseerbuis. Op de meters die op het frontpaneel zijn gemonteerd, kan men de anodespanning en de buisstroom aflezen. De anodespanning kan,

drische buisje onder de röntgenbuis. *Fig. 7* toont hoe dit buisje aan de röntgenbuis bevestigd is en geeft verder een doorsnede van de camera. Deze laatste is eigenlijk niet anders dan een cilinder waarin zich een zuiger bevindt. Een veer drukt deze zuiger omhoog, zodat film, preparaat en preparaatdrager tegen de rubberring *1* worden gedrukt.

Op de canule, die men in fig. 6 en 7 onder de camera ziet, kan een (b.v. met een waterstraalpompje verbonden) vacuümslang worden aangesloten. Het is hierdoor mogelijk de camera te evacueren, en zo de absorptie van röntgenstraling in de lucht — die, zoals fig. 1*a* toonde, niet te verwaarlozen is — vrijwel tot nul te reduceren.

[7]) Zie G. C. E. Burger, B. Combée en J. H. van der Tuuk, Philips techn. T. **8**, 327, 1946.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 6. Het apparaat voor contactmicroradiografie CMR 5. Op het frontpaneel onderscheidt men de meters en de instelknoppen voor buisstroom (max. 5 mA) en anodespanning (max. 5 kV). De knop in het midden dient voor de fijne instelling van de stroom. Het signaallampje links daarvan brandt wanneer de anodespanning is ingeschakeld. Tussen de meters bevindt zich een verlichtingslampje, dat kan worden ontstoken met de schakelaar *L*. De beide andere schakelaars dienen voor het inschakelen van de netspanning en van de anodespanning. De röntgenbuis bevindt zich in het naar rechts uitstekende gedeelte van de kast. De „camera" wordt in het cilindrische buisje geschoven dat daar naar beneden uitsteekt (vgl. fig. 7).

Wanneer men moet werken met belichtingstijden langer dan ca. 15 minuten, heeft het zin de röntgenbuis te koelen. Dit kan heel eenvoudig door een ventilator aan te sluiten op een buis die zich aan de achterzijde van de kast bevindt. Door het geperforeerde uiteinde van de huls die de röntgenbuis beschermt, wordt dan lucht aangezogen. Op deze wijze blijft de temperatuur van film en object laag en voorkomt men onscherpte die zou kunnen ontstaan doordat thermische uitzetting een verschuiving van object en film ten opzichte van elkaar veroorzaakt.

De kwaliteit der röntgenstraling

Bij het toepassen van de, in de inleiding genoemde, wetten die de absorptie van röntgenstraling in materie beschrijven, dient bedacht te worden dat de door het apparaat uitgezonden en voor het fotograferen gebruikte straling een continu spectrum heeft. De vorm van dit spectrum wordt, wanneer we de eveneens uitgezonden karakteristieke straling buiten beschouwing laten, gegeven door de formule [8]):

$$I(\lambda) \sim \frac{1}{\lambda^2}\left(\frac{1}{\lambda_0}-\frac{1}{\lambda}\right). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Hierin is $I(\lambda)$ de intensiteit van de straling bij de golflengte λ, en λ_0 de kleinste golflengte die in het spectrum kan optreden. Tussen deze laatste (in Å)

[8]) H. A. Kramers, Phil. Mag. (6) **46**, 836-871, 1923. R. H. de Waard, Acta radiol. **28**, 37-48, 1947.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

en de anodespanning van de röntgenbuis (in kV) bestaat de relatie:

$$\lambda_0 = \frac{12{,}34}{V}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

Curve *1* van *fig. 8* laat zien hoe het spectrum er uit ziet nadat de straling het berylliumvenster is gepasseerd en voor het geval dat de anodespanning $V = 3$ kV is. De minimale golflengte is 4,11 Å, de maximale intensiteit ligt echter bij 6 à 7 Å. Hieruit blijkt dus dat men V ca. $1^1/_2$ maal zo groot moet kiezen als overeenkomt met de golflengte die men op grond van overwegingen betreffende contrast en belichtingstijd gewenst acht. De andere curven in deze figuur tonen hoe de intensiteit verminderd is na het passeren van 10 micron weefsel resp. ditzelfde vermeerderd met 5 micron van de emulsie van de „Kodak Maximum Resolution" film.

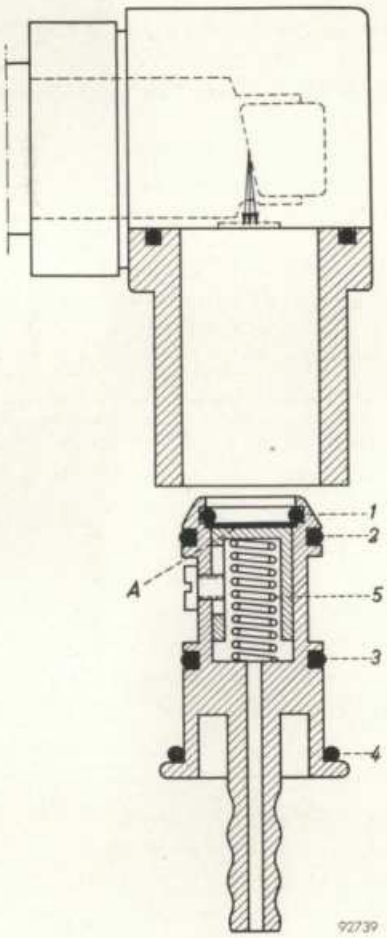


Fig. 7. Deel van de röntgenbuis, met daaraan geschroefd de cilindrische buis waarin de „camera" geschoven kan worden, en daaronder de camera, waarin zich de film, het preparaat en de preparaatdrager bevinden. De aandrukplaat is uitgevoerd als zuiger. Film, preparaat en preparaatdrager (*A*) zijn opgesloten tussen deze zuiger en de rubberring *1* en worden tegen elkaar gedrukt door de veer *5*. De overige rubberringen (*2*, *3* en *4*) zorgen voor een goede afsluiting, waardoor het mogelijk is de camera te evacueren. Men behoeft daartoe op de canule slechts een, b.v. met een waterstraalpomp verbonden, vacuümslang aan te sluiten.

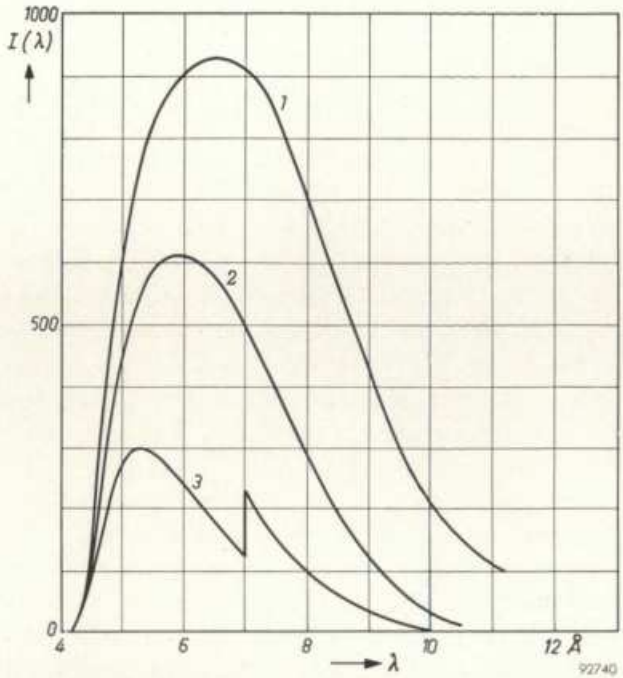


Fig. 8. Curve *1* toont de spectrale intensiteitsverdeling van de continue röntgenstraling die het apparaat CMR 5 levert bij een anodespanning van 3 kV en die wordt gemeten juist buiten het berylliumvenster. Curve *2* toont de spectrale verdeling nadat deze straling nog een laagje dierlijk weefsel van 10 micron passeerde, en curve *3* nadat bovendien een 5 micron dikke emulsielaag van „Kodak Maximum Resolution" film is gepasseerd. De sprong in laatstgenoemde curve wordt veroorzaakt door de L-absorptiekant van zilver.

De film; het vergroten van de opnamen

Daar bij de contactmicroradiografie, althans bij voldoend dunne objecten, de geometrische onscherpte zeer gering is, wordt het te bereiken scheidend vermogen bepaald door dat van de film. De beste voor het doel bruikbare films die in de handel zijn, zijn de typen „Gevaert Lippmann", „Agfa Mikrat", „Eastman-Kodak" 649-0 en „Kodak Maximum Resolution". Deze films kunnen ongeveer 1000 lijnen per mm scheiden. In vergelijking met het scheidend vermogen van de meeste andere films is dit een uitzonderlijke prestatie, maar voor de microradiografie zou men dit aantal toch gaarne nog verhoogd zien. De AgBr-korrels van de laatstgenoemde film bij voorbeeld, die een diameter van ca. 0,045 micron hebben, vullen slechts een fractie van het totale volume; er zijn er ongeveer 200 per kubieke micron, d.w.z. ca. 6 per „strekkende micron". Bovendien zijn de korrels niet volkomen gelijkmatig verdeeld; hun ruimtelijke verdeling is tot stand gekomen door een toevalsproces. Het is duidelijk dat op opnamen die met een dergelijke emulsie zijn gemaakt, geen details onderscheiden kunnen worden die zeer veel kleiner zijn dan één micron, te meer daar men bij het bekijken van een ontwikkelde film

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

met loep of microscoop zilver-„korrels" waarneemt die kleinere of grotere groepjes zijn van de zilverdeeltjes die bij het ontwikkelen uit de individuele AgBr-kristallen ontstonden. Het is deze „korreligheid" die het scheidend vermogen bepaalt, met dien verstande natuurlijk dat dit nooit beter kan zijn dan de korreldichtheid toelaat.

Praktisch kan men rekenen met een scheidend vermogen van 0,5 à 1 micron, d.w.z. men bereikt bijna de grenswaarde die voor een lichtmicroscoop geldt (0,3 micron) maar overschrijdt die niet. Men kan dus de microradiogrammen onder een normale microscoop bestuderen met b.v. een vergroting van 500×.

Een ideale emulsie voor microradiografie zou ongeveer dezelfde absorptie moeten vertonen als de bovengenoemde, maar zou een grotere korreldichtheid moeten hebben en vooral een geringere korreligheid. Deze overweging heeft reeds enkele filmfabrikanten ertoe gebracht pogingen in die richting te ondernemen. Voorlopig hebben deze experimenten meer geleid tot gevoeliger films — wat óók een belangrijk punt is — dan tot films met groter scheidend vermogen.

Een indruk hiervan geven de *fig. 9, 10* en *11*, die betrekking hebben op de experimentele emulsie

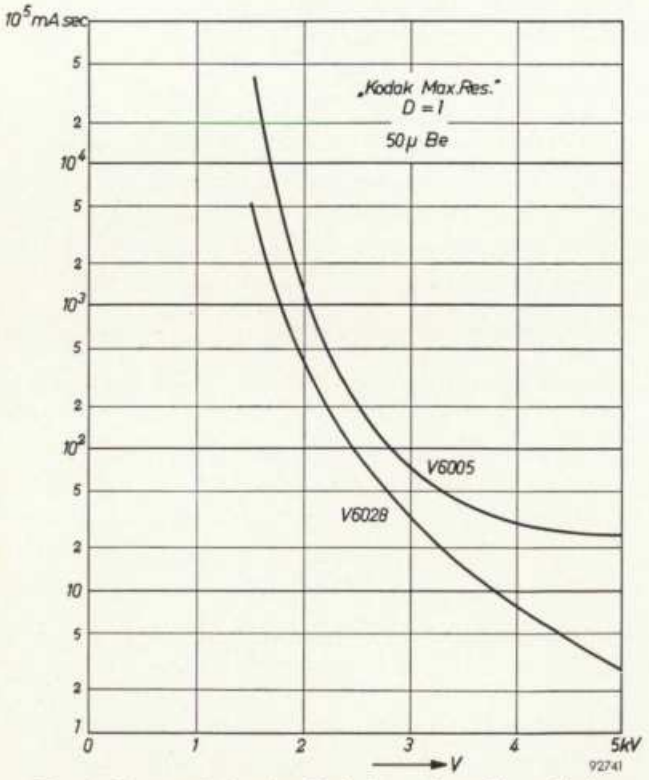


Fig. 9. De expositie, uitgedrukt in mAsec, die nodig is voor het bereiken van een zwarting 1, als functie van de anodespanning. De bovenste curve geldt voor de normale „Kodak Maximum Resolution" film (emulsie V 6005), de onderste voor de experimentele „Kodak" emulsie V 6028. Men ziet dat laatstgenoemde emulsie ten minste 2× en bij 5 kV zelfs 10× zo gevoelig is als de andere.

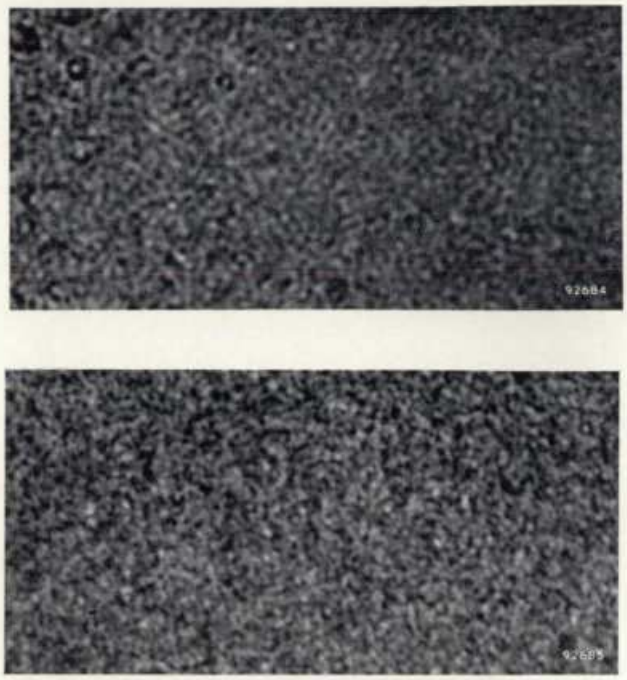


Fig. 10. Vergelijking van de korreligheid van egaal gezwarte oppervlakken. Boven de emulsie V 6005, beneden de experimentele emulsie V 6028. De beide foto's zijn gemaakt bij een anodespanning van 3 kV. Men ziet dat de korreligheid van de nieuwe emulsie ongeveer gelijk is aan die van de oude. Vergroting 1200×.

V 6028 van „Kodak" [9]). Deze verschilt van de normale „Maximum Resolution" emulsie (V 6005) hierin, dat de laag 1 micron dik is (in plaats van 5) en dat het aantal korrels per volume-eenheid 100× zo groot is; de korrelgrootte is dezelfde. Fig. 9 toont grafieken die laten zien welke expositie, uitgedrukt in buisstroom (mA) maal tijd (sec), bij diverse anodespanningen nodig is voor het bereiken van een zwarting 1. Men ziet dat de nieuwe emulsie 2 tot 10 maal zo gevoelig is als de oude. Fig. 10 geeft een indruk van de korreligheid van egaal gezwarte oppervlakken van beide films, terwijl fig. 11 een vergelijking mogelijk maakt van het scheidend vermogen. Men ziet dat op deze opnamen de korreligheid bij de nieuwe emulsie niet sterker maar ook niet aanzienlijk minder is dan bij de oude. Men kan dus zeggen dat de experimentele emulsie V 6028 veel gevoeliger is dan de tot nu toe bekende „Maximum Resolution" zonder dat het scheidend vermogen geringer is geworden.

Men heeft opgemerkt dat het scheidend vermogen van een emulsie groter wordt naarmate men met zachtere röntgenstraling werkt. Bij anodespanningen van minder dan 1 kV is gebleken dat op opnamen op

[9]) Dr. R. W. Berriman en Dr. R. H. Herz (Research Laboratory Kodak Ltd., Engeland) danken wij voor het maken en beschikbaar stellen van deze emulsie.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

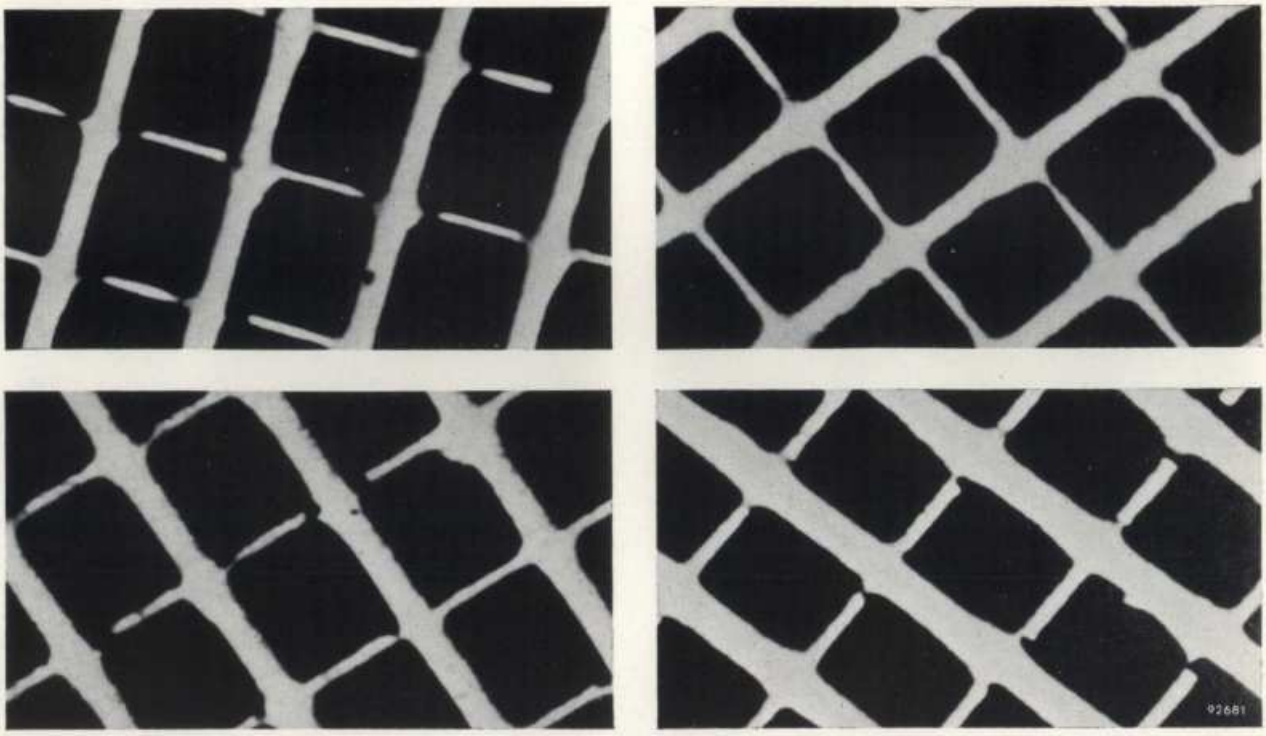


Fig. 11. Vergelijking van het scheidend vermogen van de emulsie V 6005 (boven) en de experimentele emulsie V 6028 (beneden). De beide linkerfoto's zijn gemaakt bij een anodespanning van 3 kV, de rechterfoto's bij 1,5 kV. Gefotografeerd zijn gaasjes van zilverdraad; de dikke draden hebben een diameter van 6 micron, de dunne van 2 micron. Men ziet dat het scheidend vermogen van de experimentele emulsie ongeveer gelijk aan dat van de oude en bij 1,5 kV misschien iets beter is.

een der genoemde films zelfs details van slechts ca. 0,2 micron nog te onderscheiden waren. In dat geval komt men niet meer uit met een lichtoptische vergroting, maar moet men gebruik maken van een elektronenmicroscoop. In het slothoofdstuk komen wij hierop terug.

Toepassing

De microradiografie wordt het meest toegepast in de biologie en de geneeskunde. We denken daarbij speciaal aan de histologie en de pathologische anatomie. Beperken we ons tot de laatstgenoemde terreinen, dan kan de methode op de volgende gebieden van onderzoek informatie geven die met lichtmicroscopie niet te verkrijgen is.

a) Onderzoek van niet-transparante objecten (b.v. botweefsel).
b) Onderzoek van transparante objecten waarvan bepaalde delen zichtbaar worden dank zij een chemische samenstelling welke sterk van die van de omgeving afwijkt, of waarvan delen zichtbaar gemaakt kunnen worden met contrastmiddelen; speciaal van belang is dit voor die delen die niet eenvoudig te vinden zijn met behulp van de, in de lichtmicroscopie gangbare, kleurstoffen.
c) Bepaling van het (droog-)gewicht per eenheid van oppervlakte van een object (detail) waarvan de chemische samensteling bekend is, uit de mate waarin het de röntgenstraling absorbeert.
d) Het uitvoeren van een lokale kwantitatieve chemische analyse wanneer de samenstelling kwalitatief bekend is.

We zullen in het volgende ieder van de vier genoemde toepassingsgebieden kort bespreken of er een voorbeeld uit geven [10]).

Alvorens dit echter te doen, geven we een kort overzicht van de techniek met behulp waarvan men in de lichtmicroscopie preparaten van biologische objecten maakt. Daarna gaan we na, welke gedeelten van deze techniek ook toegepast kunnen worden bij het maken van preparaten voor microradiografisch onderzoek resp. welke weggelaten of gemodificeerd worden.

Preparatieve techniek [11])

Preparaten voor lichtmicroscopisch onderzoek worden gemaakt door middel van een procédé dat uit zes stappen bestaat. Deze zijn:

[10]) Een uitvoerige behandeling van de twee laatstgenoemde toepassingsgebieden vindt men in het artikel „Historadiography" van A. Engström in „Physical techniques in biological research" Vol. 3, Acad. Press New York 1956.
[11]) Voor een uitvoerige behandeling hiervan, zie b.v. P. Metzner-Zimmermann, Das Mikroskop, F. Deuticke, Leipzig en Wenen 1928.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

1) Fixeren. Wanneer men een fragment van een levend object wegneemt, sterft dat fragment langzaam af; allerlei veranderingen kunnen daarbij optreden. Ten einde dit laatste te voorkomen, brengt men het snel in een geschikte vloeistof, waardoor het afsterven zeer bespoedigd wordt en de situatie waarin het fragment verkeerde dus wordt gefixeerd. Als fixeervloeistoffen gebruikt men, al naar gelang van het object, o.a. alcohol (96%), azijnzuur, formaline en osmiumtetroxyde (OsO_4; in de wandeling meestal „osmiumzuur" genoemd).
2) Inbedden. Het is in de regel na het fixeren niet mogelijk van het fragment de vereiste dunne coupes te maken. Daarom wordt het eerst ingebed in (d.w.z. geheel doordrenkt mèt) b.v. paraffine. Het wordt daartoe eerst watervrij gemaakt door het in steeds meer geconcentreerde mengsels van alcohol en water te brengen (ca. 10 stappen). Daarna brengt men het in alcohol-xylolmengsels die steeds meer xylol bevatten (3 stappen), en ten slotte via xylol-paraffine in zuivere paraffine.
3) Snijden. Het geparaffineerde object wordt met behulp van een microtoom in dunne plakjes gesneden.
4) Opplakken. Dit geschiedt aldus dat men op het objectglas een druppeltje eiwitglycerine brengt. Daarna voegt men een druppel gedestilleerd water toe en let op dat die zich goed over het glasoppervlak uitbreidt. Daarna legt men de coupe op de druppel en verwarmt zacht (de paraffine mag niet smelten) tot de, meestal wat rimpelige, coupe zich uitstrekt. Ten slotte laat men het water wegvloeien en droogt aan de lucht. Hierna moet het preparaat weer gedeparaffineerd worden met xylol.
5) Kleuren. Na het deparaffineren volgt men de onder 2) genoemde reeks nog verder terug, tot men weer bij water is teruggekeerd. Het is dan mogelijk het preparaat te kleuren. De keuze van de kleurstof hangt ervan af welk detail men zien wil. Veel gebruikte kleurstoffen zijn b.v. de synthetische kleurstoffen methyleenblauw, fuchsine, eosine (kleuring van het plasma) en in de natuur voorkomende stoffen als hematoxiline (kleuring van de celkern).
6) Insluiten. Ten slotte brengt men, na spoelen met alcohol en xylol, op het object een druppel canadabalsem en bedekt men het met een dekglaasje.

Voor radiografisch onderzoek handelt men ten aanzien van de punten 1 t/m 3 juist als hierboven werd beschreven. Men plakt daarna echter het object niet op een glaasje, maar brengt het op een vliesje van formvar hetwelk zich op een metalen ringetje — de preparaatdrager — bevindt. Daar formvar tegen xylol bestand is, kan het deparaffineren op de normale wijze geschieden [12]). Het kleuren vervalt of wordt eventueel vervangen door het aanbrengen van een contrastmiddel. Uiteraard vervalt ook het insluiten.

Indien men niet de allerhoogste eisen stelt (wat voor diverse toepassingen toelaatbaar is), kunnen sommige delen van het prepareerwerk vereenvoudigd worden. O.a. kan men het fixeren en inbedden vervangen door bevriezen. Men snijdt daarna met een zg. vriesmicrotoom. Het is op deze wijze mogelijk de tijd die voor het prepareren nodig is, te reduceren van 1 à 2 dagen tot 1 à 2 uur.

Onderzoek van niet-transparante objecten

Bij het onderzoek van niet transparante objecten is het voordeel boven de lichtmicroscopie evident. *Fig. 12* toont een opname van botweefsel.

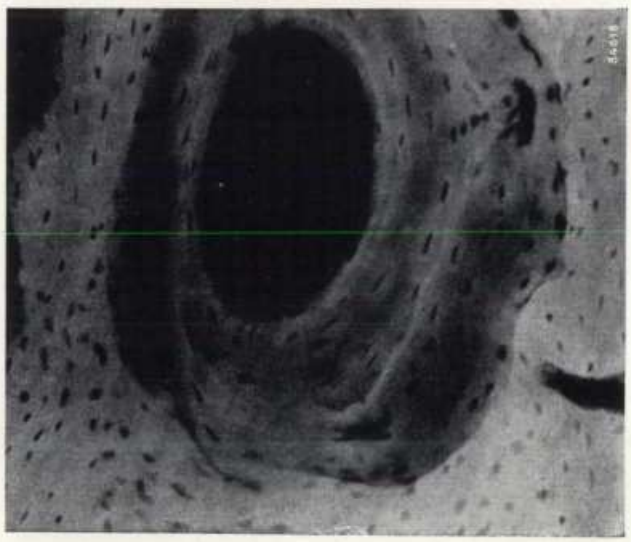


Fig. 12. Opname van botweefsel rondom een bloedvat. Om deze opname te maken, was het niet nodig het bot te decalcificeren, wat bij lichtmicroscopie wèl nodig zou zijn. Men kan daardoor uit de foto iets te weten komen over de verdeling der minerale zouten. (Opname met 5 kV, 3 mA op „Maximum Resolution" film; belichtingstijd 25 min.)

Rondom het bloedvat is de zwarting aanzienlijk groter (d.w.z. de röntgenabsorptie minder) dan op enige afstand ervan.

Met behulp van dergelijke opnamen kan men, dank zij de grote absorptiecoëfficiënt van het element, de afzetting van calcium in botweefsel

[12]) De vliesjes van formvar (polyvinylformaldehyde) zijn enkele tienden microns dik en absorberen de röntgenstraling niet in ernstige mate.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

bestuderen. Engström ontdekte aldus de aard van de beenderziekte „osteogenesis imperfecta". Het bleek dat hierbij onvolledige verkalking van het bot en op enkele plaatsen soms zelfs afbraak van het botweefsel optreedt.

Onderzoek van transparante objecten

Zo goed als het mogelijk is verschillen in chemische samenstelling te constateren aan optisch niet-transparante objecten, is dat uiteraard ook mogelijk aan transparante. *Fig. 13* geeft daarvan een fraai voorbeeld. Zonder dat men een complete chemische analyse heeft uitgevoerd, kan men hier toch constateren hoezeer de aanwezige minerale zouten zich ophopen in het bind- en niet in het klierweefsel.

Wanneer van nature tussen bepaalde delen van een object op de opnamen geen of weinig contrast aanwezig is, kan men dat soms kunstmatig teweegbrengen met behulp van contrastmiddelen. Daartoe is vereist dat men stoffen vindt die zware elementen bevatten en die de eigenschap hebben het object niet gelijkmatig te doordringen, maar zich op zeer bepaalde plaatsen te nestelen. Zo gebruikt men dikwijls $AgNO_3$ voor het „ophalen" van zenuwvezels, Os-verbindingen voor vetweefsel en, in de plantkunde, J (in de vorm van een oplossing hiervan in water waarin eerder KJ werd opgelost) voor zetmeel.

Fig. 13. Opname van een coupe (10 micron dik) van een hypertrofische prostaat. Duidelijk blijkt het verschil in concentratie van minerale zouten in klier- en in bindweefsel. (Opname met 3 kV, 3 mA op „Eastman-Kodak" 649-0 film; belichtingstijd 45 sec.) Toelichting: het bindweefsel verschijnt in de opname zeer licht, het klierweefsel grijs; de grote zeer donkere partijen worden veroorzaakt door het lumen (met vloeistof gevulde ruimte, in het algemeen dienende voor transport).

Een fraaie toepassing is ook het volgen van het gebeuren tijdens een fixatie met OsO_4. Fixeren met OsO_4 — in de elektronenmicroscopie veel gebruikt — gaat nl. langzaam en bewerkstelligt (uiteraard ongewenste) veranderingen in het object. Zo doet het b.v. op den duur de strepen van dwars gestreept spierweefsel verdwijnen. Door microradiografisch onderzoek heeft men hierin een beter inzicht kunnen krijgen [13]).

Bepaling van het gewicht per eenheid van oppervlakte van delen van biologische objecten

Voor het bepalen van het gewicht per eenheid van oppervlakte bestaan diverse methodes. De meest gebruikelijke is die waarbij men tegelijk met het object een vergelijkingsobject fotografeert [14]). Dit laatste is b.v. een „trapje" van collodion, hetwelk is gemaakt door een aantal steeds kleinere collodionvliesjes op elkaar te leggen. *Fig. 14* geeft hiervan een indruk. Bij deze werkwijze is het nodig dat men over een niet te kleine, homogeen door de röntgen-

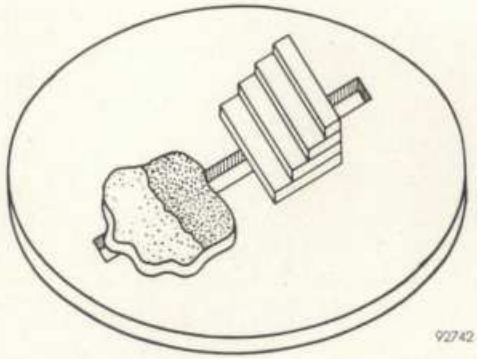


Fig. 14. Schematische voorstelling van een preparaatdrager waarop naast elkaar liggen een object en een collodiontrapje. Uit het bekende gewicht per eenheid van oppervlakte van iedere trede en de bijbehorende zwarting kan men een curve construeren met behulp waarvan men uit de zwarting die een bepaald deel van de opname vertoont, het gewicht per eenheid van oppervlakte van het overeenkomstige deel van het object kan vinden.

stralen verlichte, oppervlakte beschikt. Kort geleden is een methode voorgesteld waarbij het gebruik van een vergelijkingsobject niet meer noodzakelijk is [15]). Men maakt daarbij op één film een aantal opnamen met verschillende belichtingstijd en verkrijgt aldus het verband tussen de zwarting en de expositie. Het afleiden van de massa uit de doorlating gebeurt via een relatie tot het verkrijgen waarvan men wèl een vergelijkingsobject nodig heeft, maar hiervoor

---

[13]) A. Recourt, Verslag van het „Symposium on X-ray microscopy and microradiography", Cambridge 1956.
[14]) B. Lindström, Acta Radiol., Suppl. **125**, 1955.
[15]) B. Combée en A. Engström, Biochim. biophys. Acta **14**, 432-434, 1954.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

is eenvoudig een luchtlaag van bekende dikte, temperatuur en druk te gebruiken.

Kwantitatieve chemische analyse

Objecten waarvan de chemische samenstelling kwalitatief bekend is, kunnen, zoals reeds werd opgemerkt, met behulp van röntgenopnamen kwantitatief geanalyseerd worden, en wel van plaats tot plaats. Men maakt voor de bepaling van het gehalte van een zeker element twee opnamen, bij golflengten die dicht bij een absorptiekant van het desbetreffende element liggen, maar aan verschillende zijden ervan. Uit de verhouding van de transmissies en het bekende verloop van de absorptiecoëfficiënt met de golflengte van de straling is het gezochte percentage af te leiden [16]). Voor deze metingen is dus monochromatische röntgenstraling nodig, hetgeen betekent dat ze met het apparaat CMR 5 niet zonder meer uit te voeren zijn.

Resumerend kan gezegd worden dat met het verschijnen van het apparaat CMR 5 het doel, de microradiografie te maken tot een even eenvoudige techniek als de lichtmicroscopie, zeer veel naderbij is gekomen; de microradiografie is thans binnen het bereik gekomen van velen die tegen het bouwen van een gecompliceerde apparatuur opzien, en wel voor een prijs die vergelijkbaar is met die van een goede lichtmicroscoop. Het klaarmaken der preparaten kost minder tijd dan bij de lichtmicroscopie en is voor het routinewerk van de patholoog geen onoverkomelijk bezwaar. Bovendien vereist het geen techniek die niet reeds van de lichtmicroscopie bekend is.

De belangrijkste kenmerken van het nieuwe apparaat zijn: 1) het gebruik van een afgesmolten röntgenbuis, 2) eenvoudige kleine hoogspanningsgenerator, 3) compacte constructie, 4) klein focus waardoor de geometrische onscherpte zo gering is dat het scheidend vermogen alleen bepaald wordt door de film (ca. 0,5 micron). Het is bruikbaar in alle bovenbesproken toepassingsgebieden behalve de kwantitatieve chemische analyse.

Experimenten met anodespanningen lager dan 1 kV

Hierboven werd reeds opgemerkt dat het scheidend vermogen van een emulsie beter wordt naarmate de röntgenstraling langgolviger is. Het is interessant te zien hoe dit verschijnsel zich voortzet bij anodespanningen die nòg lager zijn dan de met het boven beschreven apparaat bereikbare 1,5 kV. Gebleken is dat bij golflengten overeenkomend met een anodespanning lager dan 1000 V de kleinste afstand die een der genoemde filmtypen kan scheiden, ca. 0,2 micron bedraagt [17]). Om hiervan ten volle profijt te hebben, kan men bij het vergroten niet meer volstaan met een lichtmicroscoop, maar men moet gebruik maken van een elektronenmicroscoop.

Ook door ons zijn experimenten op dit gebied gedaan [18]). Daarbij werd gebruik gemaakt van een röntgenbuis als in het apparaat CMR 5 voorkomt, maar zonder afsluitend venster. Object en film werden in principe op de normale wijze aangebracht, met dien verstande dat het object bedekt werd met een laagje Al van 0,1 à 0,2 micron ten einde te voorkomen dat de film ook getroffen zou kunnen worden door licht van de gloeiende katode. *Fig. 15* brengt dit alles in beeld. Op deze

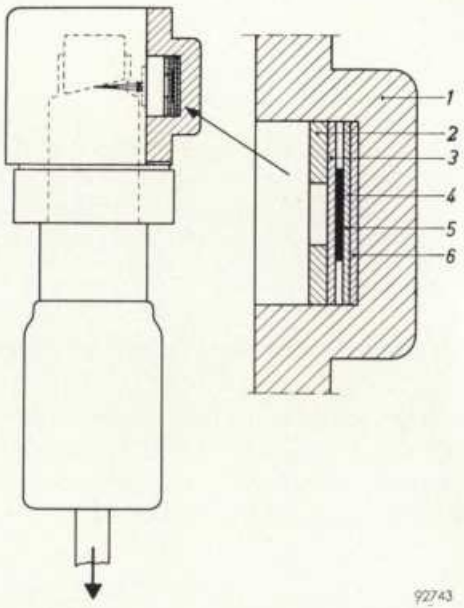


Fig. 15. Röntgenbuis en camera voor contactmicroradiografie bij anodespanningen lager dan 1,5 kV. De buis is dezelfde als die welke in het apparaat CMR 5 voorkomt, maar de pompstengel is niet afgesmolten. Verder is geen berylliumvenster aangebracht. In de camera (*1*) bevinden zich (gezien vanaf de trefplaat) achtereenvolgens de preparaatdrager (*2*) waarop een collodionvliesje (*3*), het preparaat (*4*), een daarop gedampt Al-laagje (*5*) om te voorkomen dat het, nu niet door het Bevenster afgeschermde, licht van de katode op de film valt, en ten slotte de film (*6*).

wijze kan men, zonder in extreem lange belichtingstijden te vervallen, de anodespanning doen dalen tot 500 V. Uiteraard was de consequentie van deze werkwijze dat de buis na het laden van de camera steeds opnieuw geëvacueerd moest worden. *Fig. 16* toont twee opnamen van de slokdarm van de cavia die gemaakt zijn bij anodespanningen van 1000 resp. 850 V (vgl. ook fig. 2). De *fig. 17* en *18* tonen welk een uitstekend scheidend vermogen hier bereikt kan worden. De eerste is een lichtoptische vergroting van een detail van fig. 16*b*, de tweede een elektronenoptische met nog sterkere vergroting.

Het vergroten met behulp van een elektronenmicroscoop introduceert een nieuwe complicatie. Een opname op een film is nl. te dik om als object voor een elektronenmicroscoop te kunnen fungeren. Men moet trachten zo veel mogelijk overtollig materiaal (de celluloidfilm en de gelatine van de emulsie)

[16]) Zie Part III van [11]).

[17]) R. C. Greulich en A. Engström, Exptl. Cell Research **10**, 251-254, 1956 (no. 1).

[18]) Zie noot [13]).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

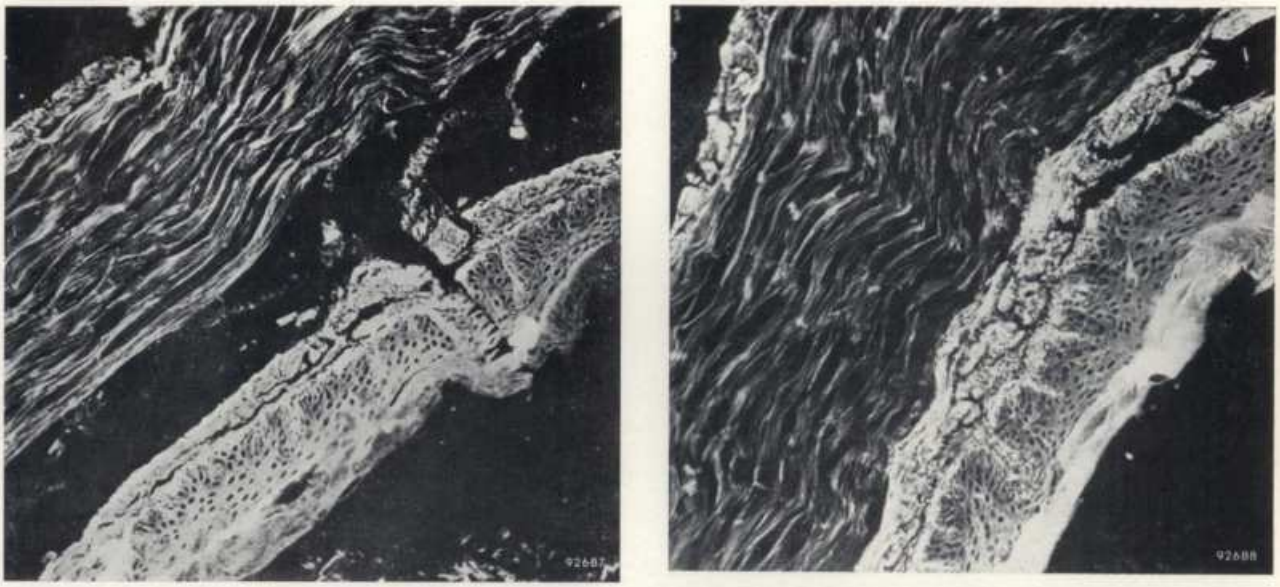


Fig. 16. Slokdarm van de cavia, opgenomen bij 1000 V en 850 V (linker- resp. rechterfoto). Men ziet dat het scheidend vermogen van de film nog weer beter is dan op de opname bij 1,5 kV die in fig. 2 getoond werd. Lichtoptisch vergroot (130×).

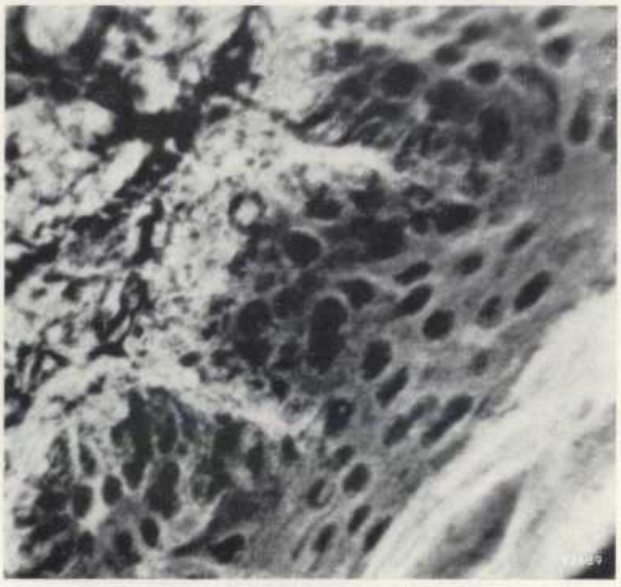


Fig. 17. Detail van de opname bij 850 V van fig. 16. Lichtoptisch vergroot (600×).

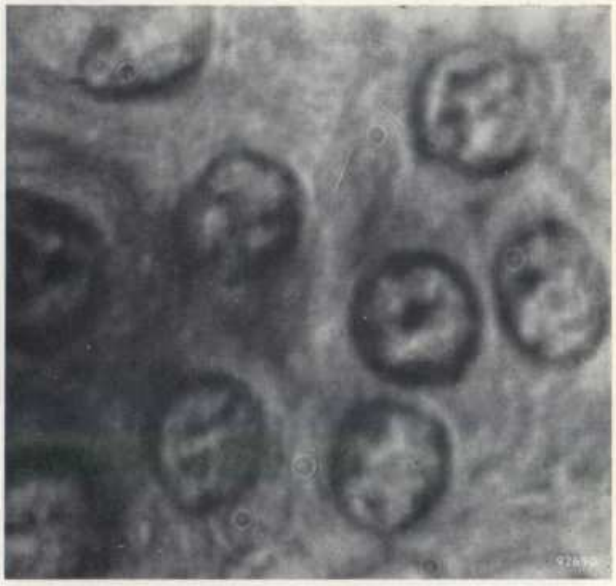


Fig. 18. Detail van de opname bij 850 V van fig. 16. Elektronenoptisch vergroot (2000×).

te verwijderen en uiteindelijk alleen de ontwikkelde zilverkorrels op een formvarvliesje te krijgen. Via een vrij gecompliceerd procédé, gedeeltelijk afkomstig van Comer en Skipper [19]), is dit mogelijk.

[19]) J. J. Comer en C. J. Skipper, Science **119**, 441-442, 1954.

Samenvatting. Om contrastrijke röntgenfoto's te maken van dunne coupes (b.v. 10 micron dik) van biologisch materiaal, is het noodzakelijk te werken met zachte röntgenstraling. Deze zachte röntgenstraling kan uit een röntgenbuis niet naar buiten treden, tenzij men erin slaagt deze te voorzien van een buitengewoon dun venster van materiaal met een laag atoomnummer. Tot voor kort was het technisch niet mogelijk dergelijke vensters vacuümdicht te maken. De röntgenbuizen moesten gemonteerd worden op een pomp, welke tijdens het maken van een opname voortdurend in werking was. De laatste jaren is het gelukt een afgesmolten röntgenbuisje te maken, geschikt voor spanningen van 1,5 tot 5 kV, hetwelk is afgesloten door een venster van beryllium ter dikte van 50 micron. Een zeer handelbaar apparaat voor contactmicroradiografie (CMR 5) is ermee uitgerust. Het apparaat bevat verder een kleine hoogspanningsgenerator, die de anodespanning voor de buis levert. Deze kan continu gevarieerd worden tot max. 5 kV. Ook de buisstroom kan geregeld worden (max. 5 mA). De gloeistroom van de röntgenbuis is gestabiliseerd. Wanneer de anodespanning wordt uitgeschakeld, wordt de gloeispanning automatisch wat verlaagd terwille van een langere levensduur van de buis. Voorzieningen zijn aangebracht om bij lange belichtingstijden te kunnen koelen en om desgewenst de camera te evacueren, b.v. met een waterstraalpompje, ter vermijding van absorptie der röntgenstraling in lucht. Daar het focus klein is (0,3×0,3 mm) en film en object met elkaar in contact zijn, is de geometrische onscherpte klein. Het scheidend vermogen wordt dan ook uitsluitend bepaald door de film. Het bedraagt 0,5 à 1 micron en benadert dus datgene wat men met een lichtmicroscoop kan bereiken (0,3 micron), maar overtreft dit niet. Dit betekent dat men voor het vergroten der opnamen voldoende heeft aan een

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gewone lichtmicroscoop. Onderzoekingen naar de mogelijkheid om films met gunstiger scheidend vermogen te produceren, zijn gaande in de laboratoria van diverse filmfabrieken.

De preparatieve techniek is ongeveer gelijk aan die voor lichtmicroscopie, met dien verstande dat ze meestal eenvoudiger kan zijn. Het maken van een preparaat vereist dan niet meer dan 1 à 2 uur. De grote betekenis der microradiografie komt speciaal naar voren wanneer men te doen heeft met niet-transparante objecten (bot) en/of wanneer het, meer dan om de geometrie van het object, gaat om een inzicht in fysisch-chemische vraagstukken zoals b.v. de verdeling van minerale zouten in een weefsel, het gewicht per vierkante micron van bepaalde delen van een object of — wat mogelijk is wanneer men over monochromatische röntgenstraling beschikt — om een lokale kwantitatieve chemische analyse. Voorbeelden van dergelijke problemen, ontleend aan de histologie en de pathologische anatomie, worden besproken.

Ten slotte wordt kort ingegaan op enkele experimenten waarbij zich tussen het röntgenfocus en het object in het geheel geen venster bevond, en waarbij een anodespanning van minder dan 1 kV werd gebruikt. Bij gebruik van zo zachte röntgenstraling vertonen de gangbare films een scheidend vermogen van 0,2 micron. Om hiervan het volle profijt te hebben, moet men de opnamen vergroten met een elektronenmicroscoop.

HET ONTSPANNEN VAN BALLONS VAN TELEVISIEWEERGEEFBUIZEN

De ballon van een weergeefbuis bestaat uit drie delen: een venster, een conisch gedeelte en een hals. Bij het aaneensmelten van deze delen tot een ballon ontstaan spanningen in het glas. Om deze te doen verdwijnen, leidt men de ballons op een transportband door een tunneloven. Bovenstaande foto, genomen in de nieuwe weergeefbuizenfabriek te Eindhoven, geeft hiervan een beeld.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

EEN OPENLUCHTLABORATORIUM VOOR WEGVERLICHTING

628.971.6.006.2

Bij de nieuwe Philipsfabriek te Turnhout (België), voor de vervaardiging van natrium- en kwiklampen, is sedert ruim een half jaar een openluchtlaboratorium voor wegverlichting in gebruik. Zoals blijkt uit *fig. 1*, bestaat dit openluchtlaboratorium in hoofdzaak uit een brede weg (lengte 320 m, breedte 14 m), voorzien van tien op wagens geplaatste lichtmasten. De uitleggers van deze masten, waaraan de armaturen worden bevestigd, zijn in hoogte instelbaar met behulp van op de wagens aangebrachte elektrische lieren. De ingestelde hoogte kan op een schaal worden afgelezen en bedraagt maximaal 12,50 m boven de grond. Met het oog op het verwisselen der armaturen is de minimale hoogte ca. 1 m boven de grond gekozen (*fig. 2*).

Het doel van het laboratorium is vierledig, nl.: het verrichten van fundamenteel onderzoek op het gebied van wegverlichting; het beoordelen van nieuwe armaturen en lampen; het verlenen van hulp bij het ontwerpen van wegverlichtingsinstallaties; en het geven van demonstraties.

Fundamentele problemen, zoals de bij straatverlichting ondervonden hinder door verblinding, en de met het oog op de zichtbaarheid gewenste gelijkmatigheid van de wegdekhelderheid, kunnen slechts ten dele op verkleinde schaal binnenshuis worden bestudeerd. In een bepaald stadium zal een toetsing aan de werkelijkheid, waartoe het openluchtlaboratorium de mogelijkheid biedt, noodzakelijk zijn.

Fig. 1. Overzicht van Philips' openluchtlaboratorium voor wegverlichting, bij dag.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De ontwerper van armaturen en lampen krijgt in het openluchtlaboratorium de gelegenheid, de verwachtingen die hij van zijn ontwerp heeft op grond van binnenshuis verrichte fotometrische waarnemingen, aan de realiteit te toetsen. Hierdoor kan men op beter verantwoorde wijze beslissen omtrent het in fabricage nemen van een nieuw produkt.

Fig. 2. Demonstratie van de verwisseling van armatuur. De uitlegger van de lichtmast is geheel omlaaggebracht. De armaturen zijn gemonteerd op sleden die aan de uitlegger worden geschoven. De sleden passen ook in de gleuven die zijn aangebracht in de met luiken lichtdicht gesloten kast die op de wagen is gebouwd (zie ook fig. 3). Op de achtergrond een bestelauto die als meetwagen is ingericht (zie ook fig. 5).

Bij het ontwerpen van wegverlichtingsinstallaties is gebleken dat men aan berekeningen alleen niet genoeg heeft om zich een volledig beeld te vormen van de merites der gedachte installatie. Dit geldt reeds voor een situatie met droog wegdek, maar in versterkte mate voor een situatie met nat wegdek, welke men toch onvermijdelijk in zijn overwegingen moet betrekken. Gaat het niet om standaardinstallaties voor straten of wegen zonder bijzonder karakter, maar om belangrijke verkeersaders, of om gevallen waarbij zich een ingewikkelde verkeerssituatie voordoet, dan is het zeer gewenst zich te overtuigen van de doelmatigheid der geprojecteerde installatie door middel van een proefopstelling onder omstandigheden die de praktijk zo goed mogelijk benaderen. Voor men ertoe overgaat een grote installatie aan te leggen, voorziet men dan ook dikwijls een kort traject van de te verlichten weg van een proefinstallatie, en zelfs brengt men wel langs verscheidene korte trajecten proefinstallaties aan die met verschillende lampen en armaturen zijn uitgerust. Het is duidelijk dat zelfs deze kostbare procedure niet de doelmatigste is: de mogelijkheid ontbreekt, snel wijzigingen, b.v. in de onderlinge afstand der masten en in de hoogte der armaturen, aan te brengen en aldus langs experimentele weg tot de beste oplossing te komen. In het openluchtlaboratorium daarentegen beschikt men hiervoor over de nodige faciliteiten.

Het openluchtlaboratorium leent zich er bij uitstek toe om belanghebbenden door middel van demonstraties op de hoogte te brengen van de voor- en nadelen van verschillende verlichtingssystemen. Bij dergelijke vergelijkende demonstraties is niet alleen een snelle verandering van afstand en hoogte der lichtpunten, maar ook een vlotte verwisseling van armaturen en lampen nodig. Met het oog op de lange opwarmtijd van vele der voor straatverlichting gebruikelijke gasontladingslampen, is elke wagen voorzien van een grote lichtdichte kast, waarin de aan sleden hangende armaturen met brandende lampen worden opgeborgen (*fig. 3*). De mogelijkheden die het openluchtlaboratorium, door deze faciliteiten, voor demonstraties biedt, kunnen het best met een enkel voorbeeld worden toegelicht. Onlangs werd een grote nieuwe verkeersweg in Nederland over een zeker traject voorzien van een proefinstallatie. Deze bleek, na het gereedkomen, in het geheel niet aan de verwachtingen te beantwoorden. Toen ons Lichttechnisch Laboratorium hieromtrent werd geraadpleegd, werd in het openluchtlaboratorium een demonstratie gearrangeerd, waarbij binnen een tijdsverloop van twee uur vier verlichtingssystemen werden getoond (waaronder het reeds beproefde en afgekeurde).

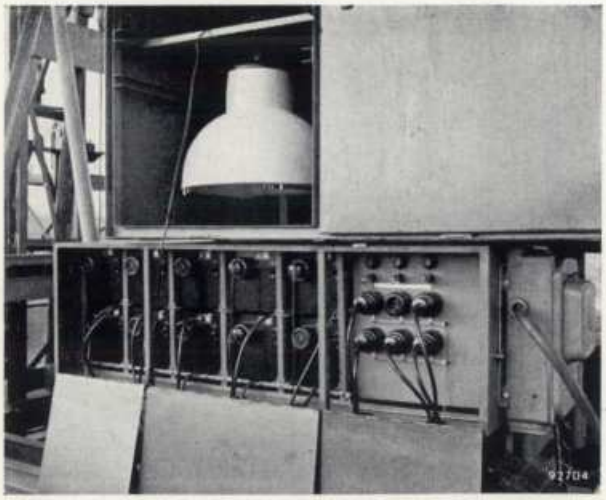


Fig. 3. Een armatuur met slede in de lichtdichte kast op de wagen, waarin verscheidene armaturen met brandende lampen kunnen worden opgeborgen. Bij verwisseling van armatuur behoeft men dan niet te wachten tot de nieuwe lamp op temperatuur is gekomen. Onder de kast de aansluitingen van de diverse voorschakelapparaten die voor de lampen nodig zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Er volgen hier nog enkele nadere bijzonderheden over de inrichting van het openluchtlaboratorium en over de daarin uit te voeren metingen.

De beschikbare weg is over 200 m voorzien van een donker wegdek (asfalt) en over 120 m van een licht wegdek (porfier, een granietachtig gesteente, in de vorm van fijn grint). Men kan aldus een algemene visuele indruk krijgen van het effect van een installatie bij donker zowel als bij licht wegdek. Om bij het doen van helderheidsmetingen, die voor de beoordeling van een situatie uiteraard van het grootste belang zijn, niet tot de twee genoemde wegdeksoorten beperkt te zijn, heeft men bovendien monsters van een aantal wegdekken gemonteerd op lage wagentjes. Door de wagentjes te plaatsen op weggedeelten waarvan men de helderheid wil meten, kan men dus al deze wegdeksoorten in een onderzoek betrekken. Om minder afhankelijk te zijn van de weersomstandigheden, zijn in het midden van de weg watersproeiers aangebracht op onderlinge afstanden van 20 m.

De lichttechnische metingen en waarnemingen die thans in het openluchtlaboratorium worden verricht, betreffen, behalve de helderheid, ook de verlichtingssterkte op het wegdek, de verblinding door rechtstreeks licht van de armaturen en de

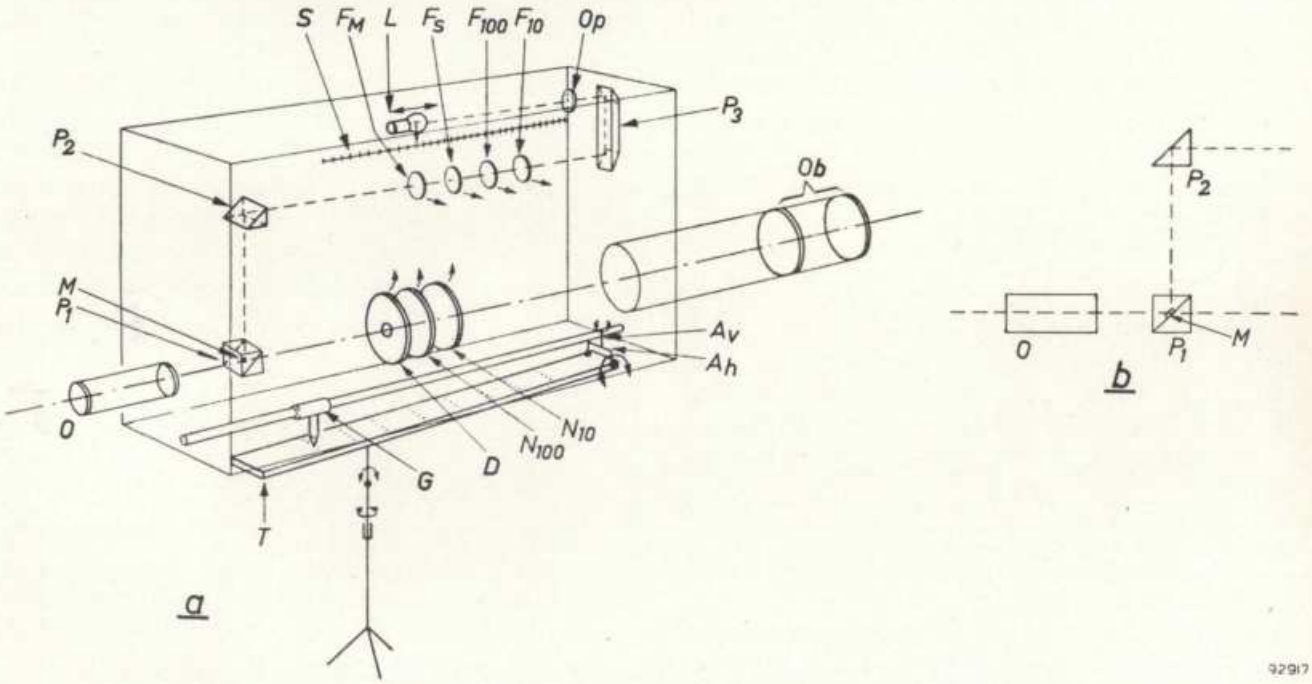


Fig. 4. *a*) Schema van de in het Lichttechnisch Laboratorium ontwikkelde visuele helderheidsmeter voor weghelderheden. Het objectief *Ob* ontwerpt een beeld van het te onderzoeken weggedeelte ter plaatse van het spiegeltje *M*, dat opgedampt is op een van de twee delen van het prisma P_1 (zie detail in (*b*)) alvorens deze delen werden samengekit. Met het oculair *O* kan men dus het beeld van de straat en dat van het spiegeltje tegelijk scherp waarnemen. *M* levert het vergelijkingsveld, waarvan men de helderheid regelt totdat deze gelijk is aan die van het weggedeelte vlak boven de bovenrand van *M*. Dit regelen gebeurt door de afstand tussen het lampje *L* en het opaalglaasje *Op* te variëren (af te lezen op de schaal *S*). Via de prisma's P_2 en P_3 neemt men in *M* namelijk de helderheid waar van *Op*. De verzwakkingsfilters F_{10} en F_{100} kan men in de lichtweg schuiven om de in *M* waargenomen helderheid met een factor 10, 100 of 1000 te verzwakken en aldus het meetgebied naar lagere helderheden te verplaatsen. De filters F_S en F_M dienen om de kleur van het vergelijkingsveld aan te passen bij een met resp. natrium- of kwiklampen verlichte weg. Met de filters N_{10} en N_{100} kan het meetgebied naar hogere helderheden worden verplaatst. *D* is een diafragma. Het totale meetgebied loopt van 0,01 tot 10^6 cd/m². Een bijzonderheid van de meter is dat het vergelijkingsveld zeer klein is (de afmetingen van *M* zijn 0,2 × 0,6 mm), waardoor men ook op grote afstand zeer plaatselijk op de weg kan meten. Een tweede bijzonderheid is de inrichting voor een nauwkeurige instelling van de optische as van de meter ten opzichte van de weg. De meter is om een horizontale as A_h en om een verticale as A_v draaibaar ten opzichte van de geharde stalen plaat *T*, welke vast met het statief is verbonden en die men, volgens een bepaalde procedure, met behulp van op de weg geplaatste richtlampen, een zekere vaste positie ten opzichte van de weg geeft. Het glijstuk *G*, dat verstelbaar is langs een vast met de meter verbonden stang, is voorzien van een pen die rust op de plaat *T*. Schuift men *G* in een meer voorwaartse positie, dan wordt de meter enigszins naar voren gekanteld om de as A_h. Het punt van de weg waarop de meter is gericht, is geheel vastgelegd door de plaats waar men de pen van *G* op *T* laat rusten. Door middel van op *T* aangebrachte merktekens kan men het punt van de weg waarop de meter is gericht, vastleggen en aflezen. Voor dit doel is *T* verlicht, terwijl in *G* een optische afleesinrichting met kruisdraden is aangebracht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zichtbaarheid van zich op de weg bevindende objecten. De onderzochte situaties worden, behalve door middel van fotometrische gegevens, steeds zo natuurgetrouw mogelijk langs fotografische weg vastgelegd.

Een deel van de instrumenten en verdere apparatuur is ondergebracht in een speciaal hiertoe ingerichte meetauto, die tevens voor metingen aan praktijkinstallaties wordt gebruikt. Voor de meting van de helderheid van het wegdek en de verdeling hiervan over het wegdek staan enige instrumenten, deels van het visuele, deels van het objectieve type, ter beschikking. Het belangrijkste instrument voor dit doel is wel een helderheidsmeter die in het Lichttechnisch Laboratorium te Eindhoven speciaal voor metingen aan wegdekken is ontwikkeld. Met een dergelijke meter meet men de helderheid, gezien vanuit een vast punt waar de meter is opgesteld, als functie van de richting. Vooral voor wegdekgedeelten die ver van de meter verwijderd zijn, correspondeert een geringe richtingsverandering reeds met een grote verplaatsing over het wegdek. Een van de eisen die men dientengevolge aan de meter moet stellen, is dat de richting van zijn optische as zeer nauwkeurig instelbaar en afleesbaar is: voor de azimuttale instelling moet deze nauwkeurigheid enige boogminuten bedragen en voor de instelling van de helling in het verticale vlak moet de nauwkeurigheid nog aanzienlijk beter zijn. In *fig. 4* is de helderheidsmeter schematisch afgebeeld; in het onderschrift is, behalve het optische principe van de meter, ook kort beschreven welke voorzieningen voor de bedoelde nauwkeurige instelling zijn getroffen [1]). Deze voorzieningen kunnen echter slechts tot hun recht komen indien de meter op vaste bodem wordt opgesteld. Hiertoe is in de bodem van de meetauto een luik gemaakt. Neemt men dit luik weg, dan kan men het statief van de helderheidsmeter direct op de weg opstellen (*fig. 5*) en toch blijven profiteren van de beschutting die de auto biedt, zowel voor het instrument als voor de waarnemer met zijn waarnemingslijsten.

92795

Fig. 5. Gezicht achterwaarts uit de als meetwagen ingerichte bestelauto (zie ook fig. 2). De helderheidsmeter L is bevestigd op een statief S, dat, door een luik T in de bodem van de auto, rechtstreeks op het wegdek is geplaatst. J is een luxmeter, C een filmcamera, die in sommige gevallen wordt gebruikt.

De proeven in het openluchtlaboratorium leveren een welkome aanvulling van het ervaringsmateriaal dat in de loop der tijden is verzameld en kunnen er in hoge mate toe bijdragen dat de ontwikkeling van de techniek der openbare verlichting gelijke tred zal houden met de snelle stijging der verkeersdichtheid.

I. HAMMING en
J. F. T. van HEEMSKERCK VEECKENS.

[1]) Voor een uitvoeriger beschrijving zie: J. B. de Boer, Lichttechnik **7**, 273-275 en 307-309, 1955, of Revue générale des Routes et des Aérodromes **25**, 83-90, 1955.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

STROBOSCOPISCH GEBRUIK VAN FOTOMULTIPLICATORBUIZEN

door C. F. HENDEE *) en W. B. BROWN *).

621.383.27

Zet men op de elektrodes van een fotomultiplicatorbuis een impulsvormige spanning in plaats van de gebruikelijke gelijkspanning, dan kan men de buis voor het erop vallende licht als het ware als sluiter doen werken, met sluitertijden van fracties van een microseconde. Hierop is een interessante methode gebaseerd voor het onderzoek van zeer zwakke lichtflitsen en voor tijdafhankelijke spectraalanalyse. Bij de voeding met impulsen gedraagt de fotomultiplicatorbuis zich in verschillende opzichten gunstiger dan bij voeding met gelijkspanning.

Doelstelling en grondslagen van de methode

De fotomultiplicatorbuis, waarin de elektronenstroom die een fotokatode onder belichting uitzendt, enorm wordt versterkt door secundaire elektronenemissie van een aantal opeenvolgende elektrodes („dynodes"), heeft in de fysica en in de techniek talrijke toepassingen gevonden. Een belangrijke toepassing is de scintillatieteller, waarmee men energierijke deeltjes of stralingsquanta aantoont, telt en wat hun energie betreft meet, door middel van de lichtflits die zij in een scintillerend kristal of vloeistof opwekken [1]). Even belangrijk is de directe intensiteitsmeting van zwakke lichtbronnen zoals sterren, spectraallijnen, enz. en van snel veranderende lichtbronnen, b.v. in de geluidsweergave en de facsimile-overbrenging [2]). Deze toepassingen berusten voornamelijk op de zeer grote gevoeligheid van de fotomultiplicatorbuis en op zijn buitengewone snelheid: de traagheid, die door de totale looptijd van een elektronenlawine door de buis wordt bepaald, bedraagt slechts enkele 10^{-8} sec.

Een speciale toepassing, die wij in dit artikel zullen bespreken en waarvoor de fotomultiplicatorbuis zich bij uitstek leent, is het onderzoek van zwakke lichtflitsen, afkomstig b.v. van elektrische ontladingen in gassen. Tot dusver ging men hierbij gewoonlijk zo te werk, dat men de versterkte uitgangsspanning van de fotomultiplicatorbuis toevoerde aan een oscillograaf, die gesynchroniseerd werd met de lichtflits. Het oscillogram geeft dan de variatie van de lichtintensiteit met de tijd weer; de lichtintensiteit kan daarbij ook die van de straling in een bepaald spectraal gebied zijn, die men door middel van een monochromator geïsoleerd heeft en op de fotomultiplicatorbuis laat vallen.

Bij zeer zwakke lichtbronnen, en speciaal als men deze spectraalanalytisch onderzoekt, waardoor de beschikbare intensiteit tot een kleine fractie slinkt, komt men ten slotte tot een situatie waarbij het hele signaal dat men wil aantonen en registreren, slechts door enkele foto-elektronen wordt gedragen [3]). Dit is duidelijk te zien in *fig. 1*: bij de kleinste lichtintensiteiten komt de geleidelijk variërende sterkte van het signaal niet meer tot uiting in een geleidelijk veranderende verticale verplaatsing van de lichtstip van de oscillograaf, doch veeleer in een verandering van de dichtheid van piekjes veroorzaakt door afzonderlijke foto-elektronen. Het behoeft geen betoog dat het niet eenvoudig is uit dergelijke signalen de relatieve intensiteit en de impulsvorm te bepalen, en dat men daarbij geen grote nauwkeurigheid kan verwachten.

Het gestelde probleem kan echter veel doelmatiger worden opgelost op de volgende wijze. Aangezien de fotomultiplicatorbuis alleen gevoelig is voor licht wanneer geschikte spanningen op de katode en op de dynodes worden gezet, kan men de buis als sluiter laten werken: men voert daartoe de genoemde spanningen slechts gedurende een scherp begrensde periode toe, d.w.z. in de vorm van een rechthoekige impuls. De tijd gedurende welke de buis „open" is, kan op deze wijze tot b.v. 10^{-7} sec worden beperkt, en men kan deze met behulp van geschikte impulsschakelingen in elke gewenste faze van de lichtflits laten vallen. De fotostroom die gedurende de „open" tijd aan de collector van de buis optreedt, meet men met een, bij voorkeur registrerende, gelijkstroommeter. Wordt nu de lichtflits periodiek herhaald en voert men de impulsen aan de fotomultiplicatorbuis altijd in dezelfde relatieve faze toe, dan kan men, door een stroommeter met grote tijdconstante te gebruiken, de impulsvormige fotostroom over een lange periode integreren zonder de informatie betreffende het tijdsverloop van de lichtflits kwijt te raken.

Men ziet dat deze werkwijze sterk gelijkt op de vanouds bekende stroboscopische waarneming,

*) Philips Laboratories, Irvington-on-Hudson, N.Y., U.S.A.

[1]) G. A. Morton, Photomultipliers for scintillation counting, RCA Rev. **10**, 525-553, 1949. A. Krebs, Szintillationszähler, Ergebn. exakt. Naturwiss. **27**, 361-409, 1953.

[2]) Zie b.v. R. W. Engstrom, Multiplier photo-tube characteristics: application to low light levels, J. Opt. Soc. Amer. **37**, 420-431, 1947.

[3]) R. F. Saxe, Detection and recording of optical transients by photo-multipliers, Nature (London) **172**, 1198, 1953.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

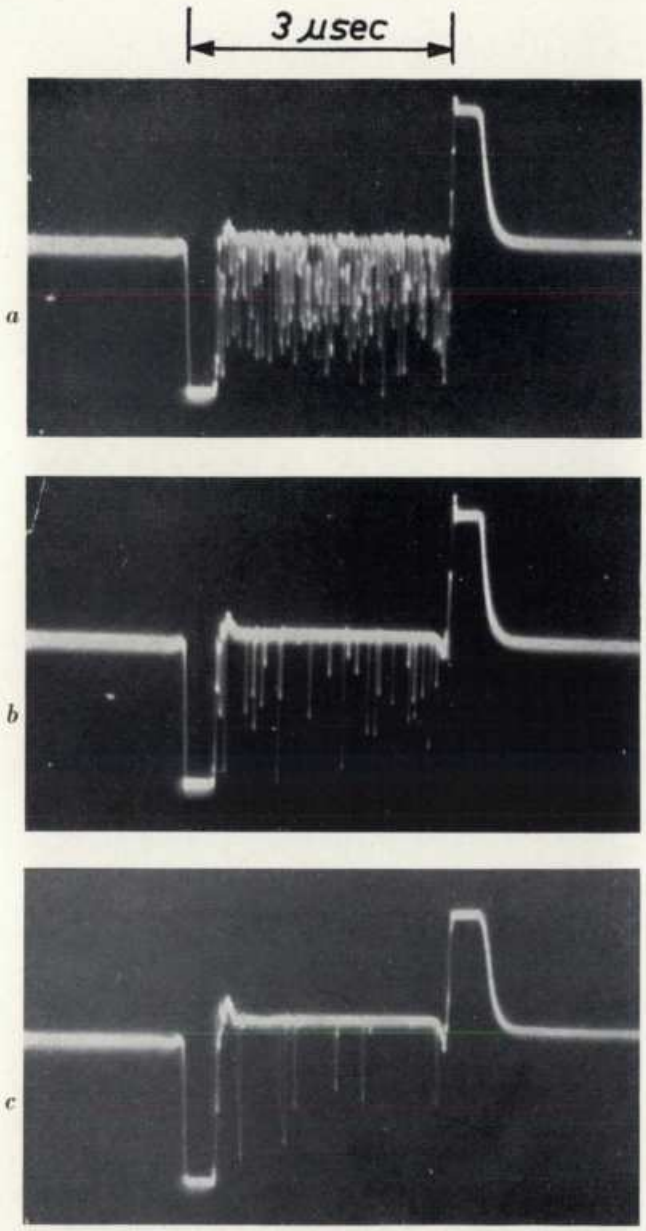


Fig. 1. Oscillogrammen van de collectorstroom van een fotomultiplicatorbuis onder zeer zwakke belichting, in intensiteit afnemend van (*a*) tot (*c*). Om later te bespreken redenen was de fotomultiplicatorbuis voor elk oscillogram slechts zeer korte tijd in werking, nl. gedurende 3 microseconden. In deze tijd worden bij de kleinste belichtingsintensiteit slechts enkele foto-elektronen vrijgemaakt. Ten gevolge van het toevalskarakter van het aankomen van de fotonen en van de secundaire elektronenemissie in de buis, treden de piekjes die door afzonderlijke foto-elektronen worden opgewekt, met onregelmatige tussenpozen op en verschillen zij merkbaar in amplitude.

De twee grote pieken (de ene links omlaag en de andere rechts omhoog gericht) in elk oscillogram van deze figuur, alsmede in de figuren 8 en 9, ontstaan doordat bij het aanleggen van de spanningsimpuls aan de dynodes door capacitieve koppeling ook een spanningsstoot op de collector van de multiplicatorbuis wordt opgewekt (vgl. fig. 10).

waarbij men van een bepaalde faze van een periodiek proces een stilstaand beeld verkrijgt [4]). De analogie gaat nog verder doordat men, evenals bij stroboscopische waarneming gebruikelijk is, de faze van de impuls op de multiplicatorbuis geleidelijk kan verschuiven, zodat de volledige lichtflits wordt afgetast.

Behalve het gemakkelijk zichtbaar maken van de impulsvorm veroorlooft deze methode ook een veel nauwkeuriger meting van de relatieve intensiteit dan bij waarneming van een enkele flits: is het licht zo zwak dat de primaire fotostroom bij elke flits slechts uit enkele foto-elektronen bestaat (of gemiddeld zelfs uit minder dan één foto-elektron), dan is de statistische fluctuatie van het aantal foto-elektronen en derhalve de fout in de intensiteitsbepaling relatief groot. Door de lichtflits te herhalen met een frequentie tot 10000 per seconde en door een integratietijd tot 10 seconden toe te passen, kan men 10^5 maal zo veel foto-elektronen verzamelen als in een enkele flits; de nauwkeurigheid wordt daardoor ongeveer 300 maal beter. Op deze verbetering komen wij hieronder nog terug.

De methode kan natuurlijk alleen worden toegepast voor lichtbronnen die men willekeurig herhaalde flitsen kan laten geven. Hiertoe behoren vele soorten elektrische ontladingen in gassen [5]). In het Philipslaboratorium te Irvington werd volgens deze methode o.a. het licht van een waterstofthyratron en het licht van een lagedrukontlading in stikstof en in andere gassen onderzocht. Meestal werd gewerkt met lichtflitsen van 1 microseconde. *Fig. 2*

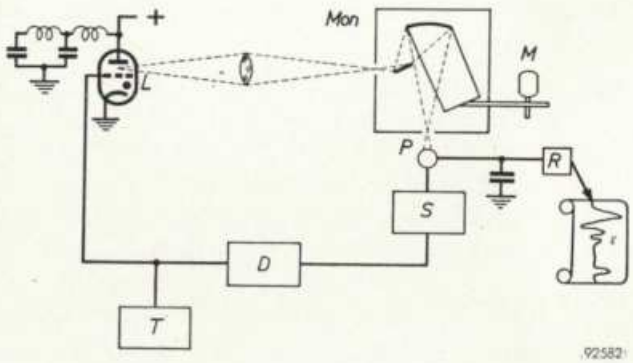


Fig. 2. Schema van de opstelling voor tijdafhankelijke spectraalanalyse met gebruik van een stroboscopisch werkende fotomultiplicatorbuis. *T* ontsteekschakeling, *L* bron van de te onderzoeken lichtflits (in dit geval een waterstofthyratron), *Mon* traliemonochromator met motoraandrijving *M*, *S* schakeling die de impulsspanningen voor de fotomultiplicatorbuis *P* levert, *D* instelbare vertragingsschakeling, *R* registrerende gelijkstroommicroamperemeter.

Bij de meeste in dit artikel beschreven proeven werd gewerkt met de RCA fotomultiplicatorbuis 1P21.

---

[4]) C. F. Hendee, Time-resolved spectroscopy with pulsed photomultipliers, J. Opt. Soc. Amer. **43**, 330, 1953 (uittreksel); C. F. Hendee en W. B. Brown, Time-resolved spectroscopy of nitrogen and hydrogen, Phys. Rev. **93**, 651, 1954 (uittreksel). Een soortgelijke techniek met langere impulsen is beschreven door A. V. Phelps and J. L. Pack, Measurement of time varying optical absorption, Rev. sci. Instr. **26**, 45-49, 1955.

[5]) C. F. Hendee, Band spectra in pulsed nitrogen discharges, Phys. Rev. **84**, 1075, 1951 (uittreksel). Zie ook R. D. Drosd, Gated multiple light pulse generator, Bull. Amer. Phys. Soc. **30**, no. 4, blz. 36, 1955 (uittreksel).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

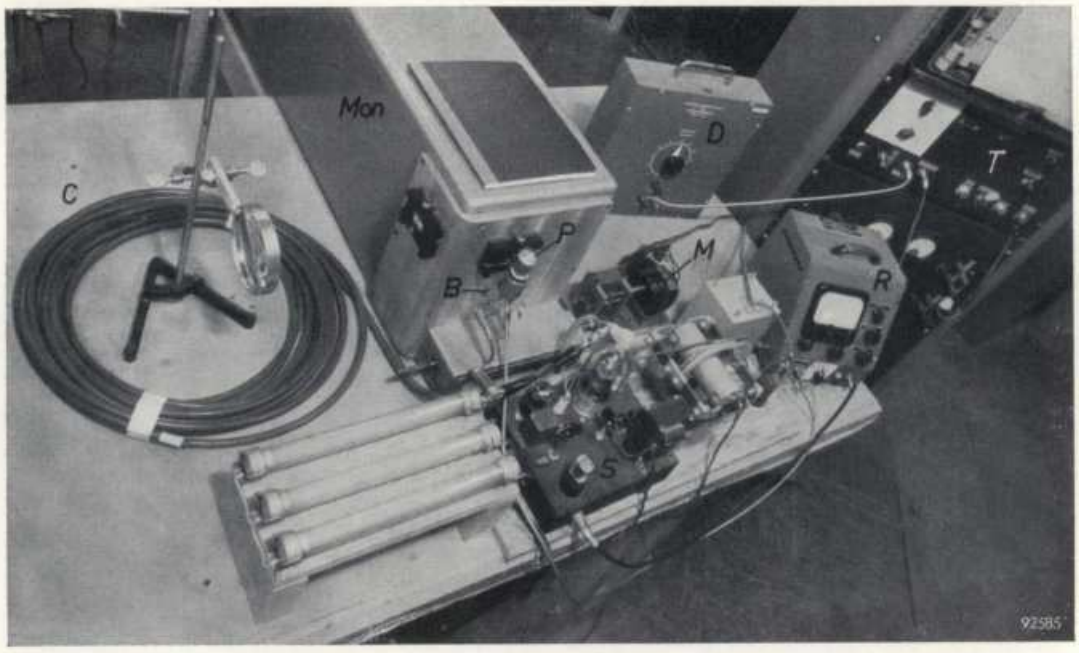


Fig. 3. Foto van de opstelling volgens fig. 2. De letters hebben dezelfde betekenis als bij fig. 2. De lichtbron bevindt zich links (niet zichtbaar). Het paneel aan de rechterzijde bevat de ontsteekschakeling T en het registrerende gedeelte van de stroommeter R. C is een stuk coaxiale kabel dat als impulsvormend netwerk in de schakeling S fungeert. B zijn de weerstanden van de spanningsdeler voor de dynodes van de fotomultiplicatorbuis (zie fig. 10).

geeft het schema van de meetopstelling; deze bevat ook een monochromator. Een foto van de opstelling is in *fig. 3* weergegeven. Om het tijdsverloop van de intensiteit van een bepaalde spectraallijn gedurende een flits te onderzoeken, wordt de monochromator vast op deze lijn ingesteld en de korte voedingsimpuls van de fotomultiplicator wordt met behulp van de variabele vertragingsschakeling D (fig. 2) langzaam in faze ten opzichte van de lichtflits verschoven. Men verkrijgt aldus een registratiestrook die de lichtintensiteit als functie van de tijd geeft [6]). Een dergelijk registrogram is in *fig. 4* afgebeeld; men ziet hierin een gedeelte van de impulsvorm van twee

[6]) Natuurlijk moet de aftasttijd doelmatig gekozen worden; de situatie is geheel analoog aan die bij het aftasten van röntgendiffractiediagrammen, waarvoor het probleem min of meer uitvoerig in dit tijdschrift is behandeld: zie W. Parrish, Meting van röntgenintensiteiten met telbuizen, Philips techn. T. **17**, 300-316, 1955.

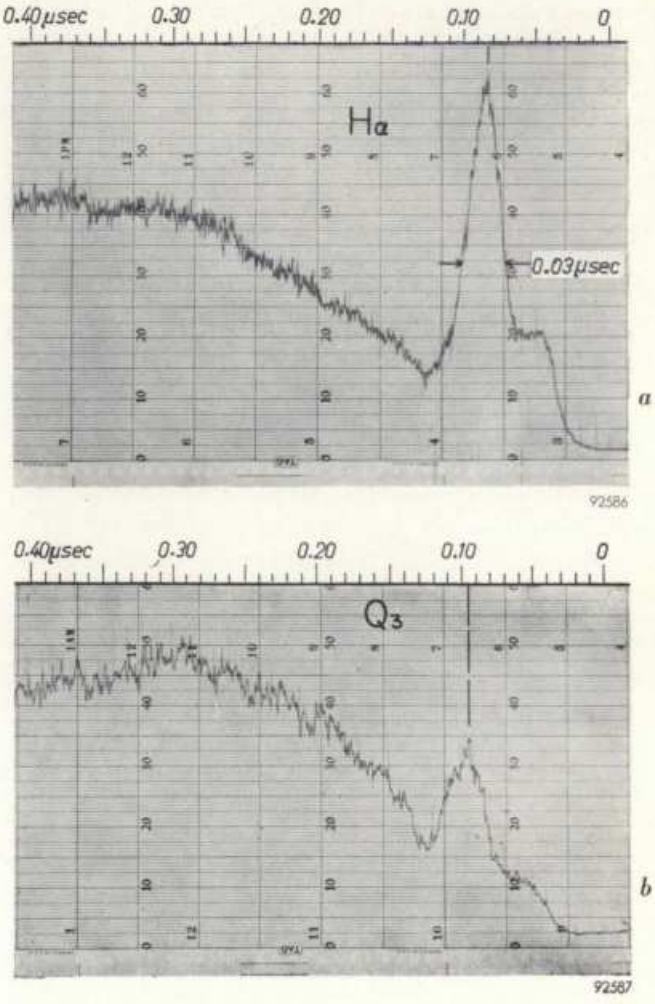


Fig. 4. Gedeelte van de registratie van het tijdsverloop der intensiteit van twee waterstoflijnen in het spectrum dat tijdens een stroomstoot van 1,0 μsec door een waterstofthyratron 4 C 35 werd uitgestraald en dat volgens de beschreven methode werd onderzocht. De tijdschaal loopt in deze figuur van rechts naar links. *a*) Lijn van atomaire waterstof bij 6563 Å. *b*) Lijn bij 6032 Å uit de $3p^3\Pi - 3s^3\Sigma$, 0-0 band van het waterstofmolecuul.

Het geregistreerde tijdsverloop is niet typisch voor impulsen van waterstofthyratrons, maar werd verkregen in een geval waarbij in het eerste gedeelte van de impuls van 1 μsec een grote stroompiek optrad. De voor het aftasten van de lichtflits van 1 μsec gebruikte spanningsimpulsen op de dynodes hadden een gemeten duur van 9×10^{-8} sec.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

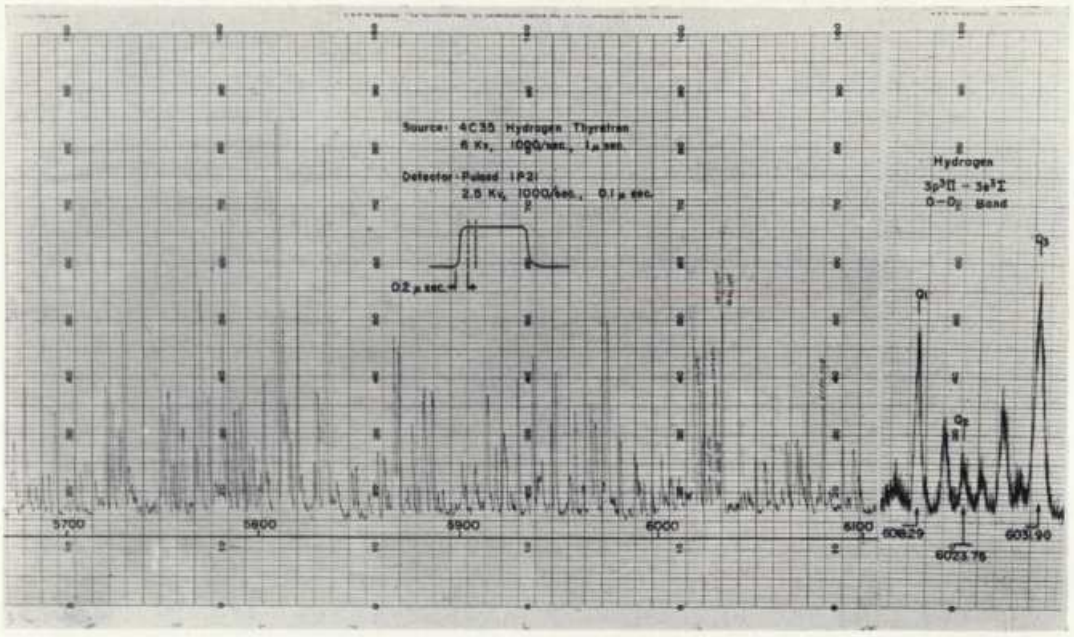


Fig. 5. Tijdafhankelijke spectroscopie: Deel van het bandenspectrum van waterstof dat door een waterstofthyratron 4 C 35 werd uitgezonden 0,2 μsec na het begin van een rechthoekige stroomimpuls met een duur van 1,0 μsec. Topspanning van het thyratron 6 kV, herhalingsfrequentie van de impuls 1000/sec. Rechts is een stukje van het afgebeelde spectrum nog eens opgenomen met grotere dispersie.

waterstoflijnen uit het spectrum dat tijdens een stroomstoot door een waterstofthyratron werd uitgezonden. Een andere mogelijkheid is deze dat men op bepaalde tijdstippen van de flits een volledig spectrum van het licht opneemt; hiertoe werkt men met een vaste instelling van de vertragingsschakeling en tast het spectrum af door de spleet van de monochromator met een motor te verschuiven („tijdafhankelijke spectraalanalyse"). *Fig. 5* is een gedeelte van het bandenspectrum van waterstof dat 0,2 μsec na het begin van de stroomstoot door het thyratron werd uitgezonden en dat op de beschreven wijze werd opgenomen. In *fig. 6* is een reeks spectra van een ontlading in stikstof (tijdsduur van de elektrische ontlading 10^{-7} sec) weergegeven, waaruit duidelijk blijkt welke grote veranderingen in een fractie van een microseconde in het spectrum kunnen optreden. Deze veranderingen ontstaan door verschillen in aanslag en levensduur van de moleculen in de gequantiseerde energieniveaus die aan de emissie der verschillende lijnen en banden deel hebben.

Gedrag van de fotomultiplicatorbuis bij voeding met impulsen

Een essentieel punt bij de beschreven experimenten is de inwendige versterkingsfactor van de fotomultiplicatorbuis. Bij voeding met impulsen kan men veel grotere versterkingsfactoren verkrijgen dan bij voeding van de buis met gelijkspanning, dank zij het feit dat men dan hogere spanningen mag toepassen. Dit opmerkelijke feit is reeds sinds een aantal jaren bekend en men heeft er herhaaldelijk gebruik van gemaakt [7]). Ook voor het optekenen van de oscillogrammen van afzonderlijke lichtflitsen in fig. 1 werd de fotomultiplicator — een buis van het type 1P21 — met een impulsspanning gevoed (van 1500 volt), aangezien bij de normale werking van deze buis (met een gelijkspanning van hoogstens 1230 volt) de versterkingsfactor niet voldoende geweest zou zijn om elk afzonderlijk fotoelektron zichtbaar te maken.

Wij hebben de versterkingsfactor gemeten en zijn variatie met de spanning onderzocht door middel van een reeks opnamen analoog aan die van fig. 1, bij constante belichting van de fotomultiplicatorbuis. Het gemiddelde aantal foto-elektronen per impuls, $\bar{n}_p$, werd geteld en de versterkingsfactor g werd uit de herhalingsfrequentie f van de impulsen op de fotomultiplicator en de gemeten gemiddelde collectorstroom $\bar{I}_p$ berekend met behulp van de vergelijking:

$$\bar{I}_p = \bar{n}_p f g e; \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

hierin is e de lading van het elektron. Beneden de voor gelijkspanning toelaatbare grens bleek de ver-

[7]) R. F. Post en N. S. Shiren, Performance of pulsed photomultiplier scintillation counters, Phys. Rev. **78**, 81, 1950. S. Singer, L. K. Neher en R. A. Ruehle, Pulsed photomultipliers for fast scintillation counting, Rev. sci. Instr. **27**, 40-43, 1956 (no. 1).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

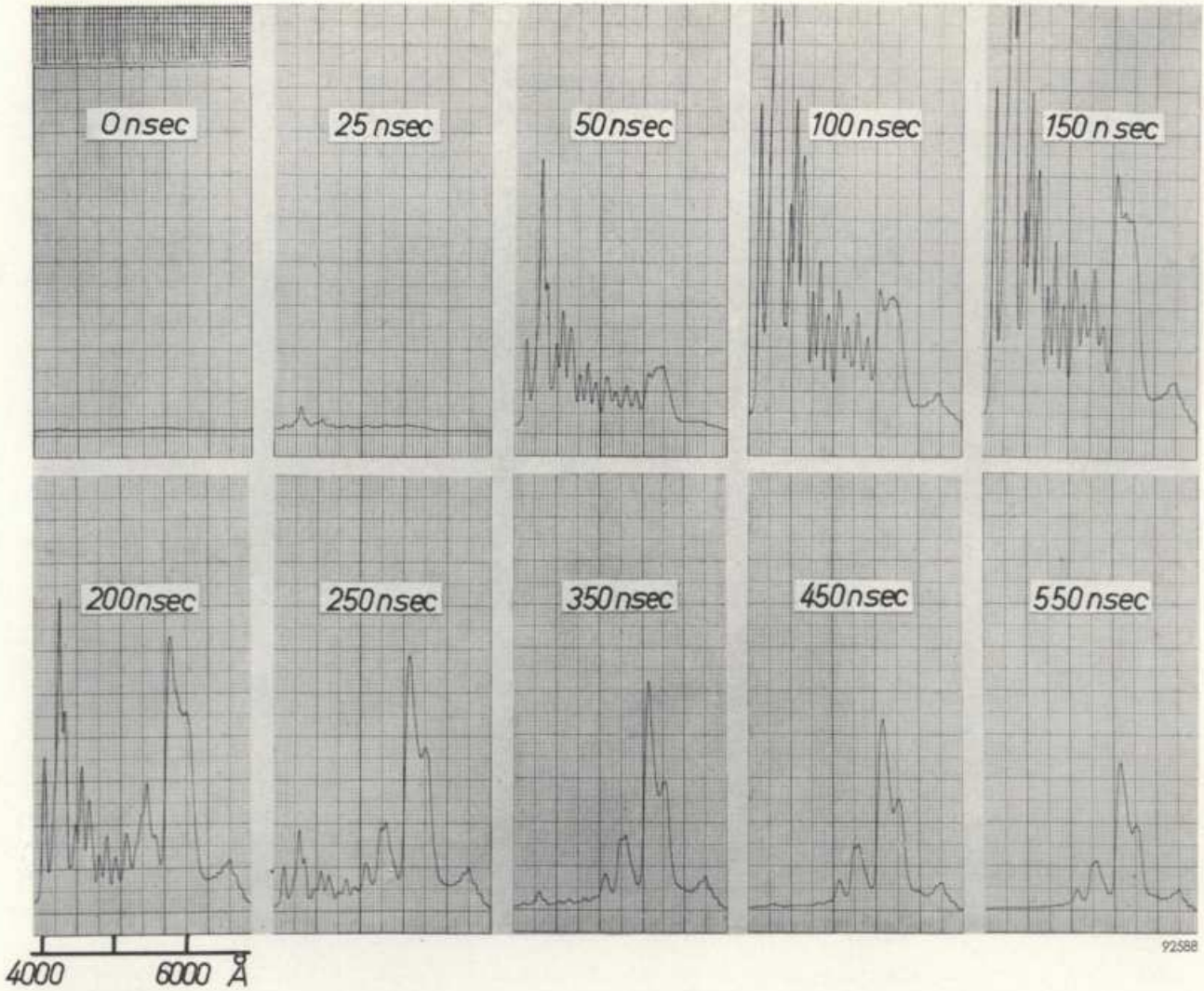


Fig. 6. Tijdafhankelijke spectroscopie: Reeks spectra van een impulsvormige ontlading in stikstof, opgenomen op verschillende momenten van de impuls, van 0 tot 550 nanoseconden na het begin van de ontlading (1 nsec = 10^{-9} sec).

De scherpe pieken in het linkergedeelte van elk spectrum ($\lambda < 5000$ Å) behoren tot het „tweede positieve bandensysteem" van N_2. De brede pieken in het rechtergedeelte ($\lambda > 5000$ Å) zijn groepen van niet-gescheiden banden van het „eerste positieve systeem". Met behulp van een scherp afsnijdend filter, „Corning" 3389, werden de sterke tweede positieve banden bij $\lambda < 4000$ Å geëlimineerd, daar anders het tweede-ordespectrum hiervan de veel zwakkere eerste positieve banden onzichtbaar zou hebben gemaakt. Een afzonderlijk onderzoek van deze banden toonde aan dat alle banden van het tweede positieve systeem ongeveer hetzelfde tijdsverloop hebben.

Uit de figuur ziet men dat de tweede positieve banden hun topintensiteit in 100-150 nsec bereiken en bij 250 nsec vrijwel verdwenen zijn. De eerste positieve banden verschijnen later (top na 150-200 nsec) en sterven veel langzamer uit. Dit is te verklaren door het feit dat het onderste quantumniveau van de overgang waarbij het tweede positieve bandensysteem wordt uitgestraald, tevens het bovenste quantumniveau is voor de overgang van het eerste positieve bandensysteem, en dat dit niveau klaarblijkelijk een veel langere levensduur heeft (halveringstijd ca. 10^{-6} sec) dan het bovenste niveau van het tweede positieve bandensysteem (ca. 10^{-7} sec). Tot dusver waren geen directe experimentele gegevens betreffende de halveringstijden van deze niveaus bekend. (Er kunnen nog andere factoren bijdragen tot de lange uitsterftijd van de eerste positieve banden, b.v. absorptie uit het onderste (metastabiele) niveau van deze overgang met hierop volgende re-emissie, of het bevolken van het bovenste niveau van deze overgang (een tripletniveau) uit het een of andere metastabiele singuletniveau, zoals voorgesteld door R. W. Nicholls, J. chem. Physics **20**, 1040, 1952.)

In soortgelijke opnamen met grotere spectrale dispersie konden de afzonderlijke banden van het eerste positieve systeem worden gescheiden. De relatieve intensiteit van deze banden varieerde slechts weinig gedurende het uitsterven en was ongeveer dezelfde als diegene die bij een normale gelijkstroomglimontlading in stikstof wordt verkregen. In dit opzicht verschilt het langzame uitsterven dat wij waarnamen (ongeveer 10^{-6} sec), van het bekende nalichten van stikstof (uitsterftijd van de orde van 1 sec), aangezien bij het laatstgenoemde de relatieve intensiteit van de banden geheel verschillend is.

sterkingsfactor bij voeding met impulsen even groot te zijn als bij voeding met gelijkspanning. Voerde men de spanning verder op — wat dus alleen bij voeding met impulsen toelaatbaar was —, dan nam de versterkingsfactor verder toe, totdat bij 2500 volt een waarde $g = 0{,}8 \times 10^9$ werd bereikt. (De opgegeven spanning is de totale spanning op de fotomultiplicatorbuis, d.w.z. die tussen katode en collector; de dynodes krijgen trapsgewijze dalende spanningen, die van een potentiometer worden af-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

genomen, zie fig. 10.) De variatie van g is in *fig. 7* weergegeven.

Terloops zij erop gewezen dat de oscillogrammen van fig. 1 duidelijk demonstreren hoe goed de sluiterwerking van de fotomultiplicatorbuis is: men ziet generlei signaal vóór of na de impuls. Vrijwel alle piekjes die gedurende een impuls optreden, zijn aan foto-elektronen toe te schrijven: men krijgt geen piekjes als men het licht onderschept, behalve een enkele keer, ongeveer eens op de 10 „open" periodes van de fotomultiplicator, een piekje dat klaarblijkelijk aan de thermische elektronenemissie van de fotokatode moet worden toegeschreven.

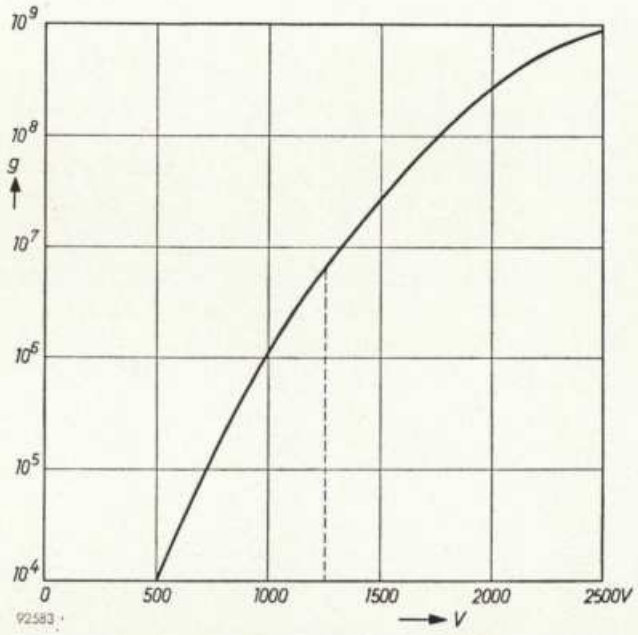


Fig. 7. Versterkingsfactor g verkregen met een RCA fotomultiplicatorbuis 1P21 bij voeding met impulsen van 10^{-7} sec, uitgezet tegen de topwaarde V van de spanning die wordt aangelegd tussen katode en collector. De bovenste grens voor voeding met gelijkspanning is gestippeld aangegeven.

Aan de hand van de oscillogrammen in *fig. 8* kan men inzien waaraan het te danken is dat bij het werken met impulsen hogere spanningen op de buis toelaatbaar zijn, en ook waardoor hieraan een grens wordt gesteld. De opnamen werden gemaakt met impulsen van 3 μsec, terwijl er geen licht op de buis viel. Bij spanningen iets boven 2500 V ziet men piekjes van geringe hoogte verschijnen, aanvankelijk zeer onregelmatig en alleen tegen het eind van de impulsduur van 3 μsec. Voert men de spanning op, dan worden deze ruispiekjes regelmatiger, zij nemen toe in hoogte en aantal en zij verschijnen vroeger in de impuls. Men kan dit gedrag verklaren door de onderstelling dat de piekjes veroorzaakt worden door positieve ionen van restgassen in de buis, die tegen de dynodes botsen en elektronenlawines doen ontstaan. Het is plausibel dat deze gasruis bij spanningen beneden 2 kV enkele μsec, of zelfs nog langer, nodig heeft om zich te ontwikkelen, en dat hij zich sneller ontwikkelt naarmate de spanning hoger is,

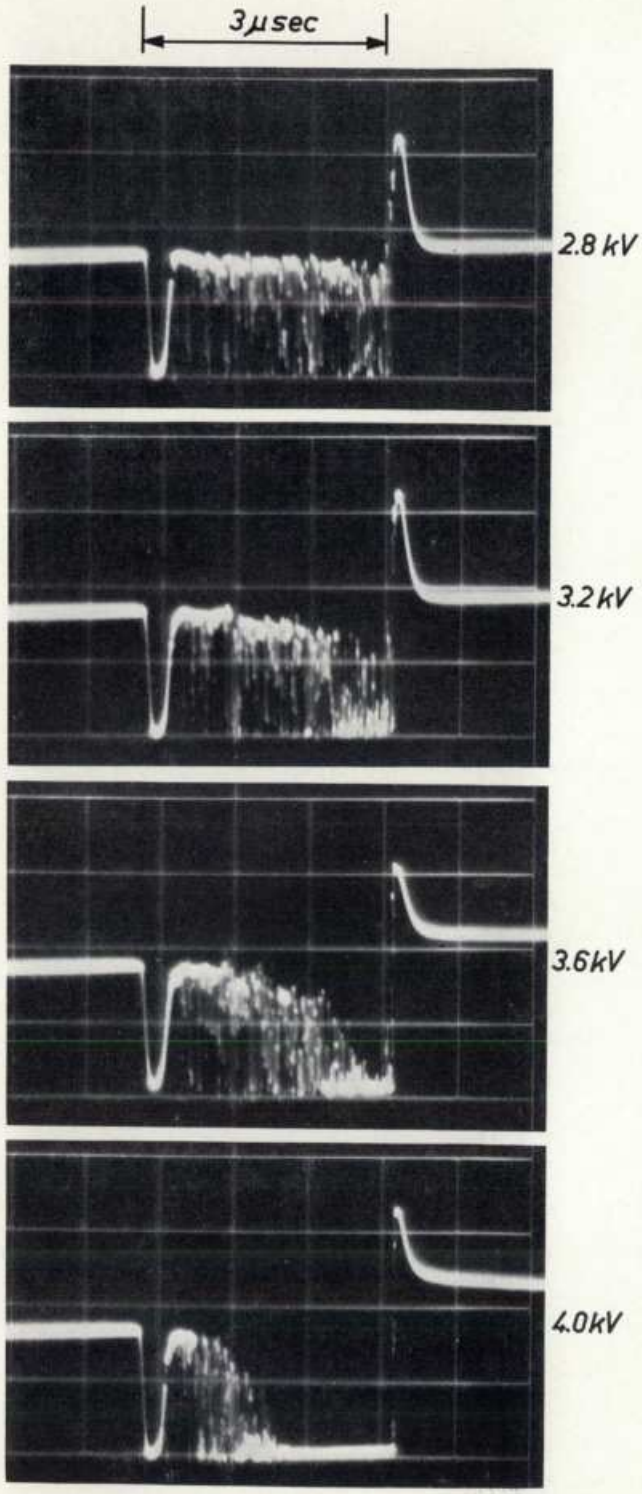


Fig. 8. Oscillogrammen van de uitgangsstroom van een fotomultiplicatorbuis gedurende een enkele impuls van 3 μsec zonder belichting, bij hoge impulsspanningen (de topwaarden zijn rechts aangegeven). De talrijke piekjes worden waarschijnlijk veroorzaakt door positieve ionen afkomstig uit restgassen in de buis (gasruis). Bij de hoogste spanningen wordt de dichtheid van de piekjes tegen het einde van de impuls zo groot dat een continue afbuiging van de schrijvende lichtstip ontstaat.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

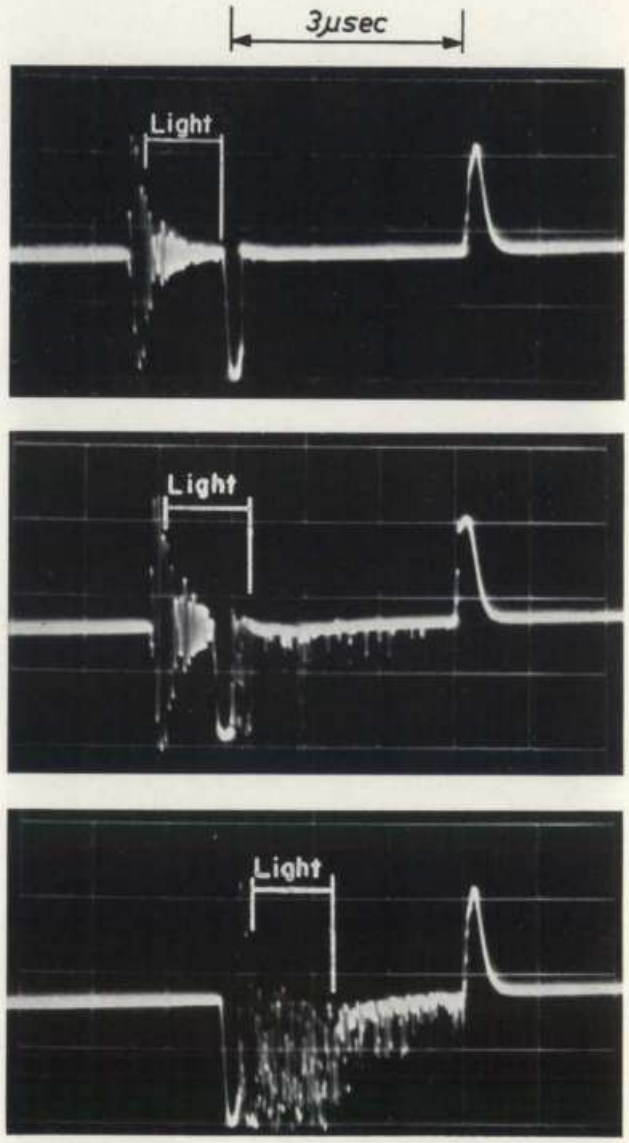
www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Maar zelfs bij spanningen van 4 kV ziet men nog dat gedurende de eerste tienden microseconden de buis vrijwel vrij van ruis is, zoals de berekende looptijden van positieve ionen inderdaad doen verwachten. Aan deze vertraging van de ontwikkeling van de gasruis is het te danken dat deze buizen met zo buitengewoon grote versterkingsfactoren kunnen werken als men ze met impulsen van 10^{-7} sec voedt.

De algemene vorm van de ruis, die in fig. 8 te zien is, blijft onveranderd als men de impulsen van 3 μsec herhaalt met frequenties tot 1000 per seconde of nog meer. Klaarblijkelijk herstelt de buis zich van de sterke gasionisatie in minder dan 1 milliseconde.

Fig. 8 liet zien hoe de buis zich gedraagt als men er een spanningsimpuls op zet zonder belichting. Bij de praktische toepassing zal het licht dat men op de buis laat vallen, het optreden van ruis bevorderen en aanleiding geven tot het verschijnen van ruispiekjes bij veel lagere spanningen dan die welke in fig. 8 werden toegepast. Dit zou tot op zekere hoogte de lineariteit van de relatieve intensiteitsmetingen kunnen bederven. Bij onze proeven is echter gebleken dat men de sterkte van de ruis aanzienlijk kan verminderen door de fotomultiplicatorbuis aan de buitenzijde van een laagje fijn verdeeld grafiet te voorzien en op dit geleidende laagje hetzij de impulsspanning van de katode te zetten of een gelijkspanning van dezelfde grootte als de topwaarde van de impuls. Hierdoor wordt waarschijnlijk het elektrische veld in de buis beperkt en daardoor de gasionisatie verminderd.

Zet men een impulsspanning op de buis en laat men in het begin van de „open" tijd een lichtflits op de fotokatode vallen, dan zal de flits ruispiekjes doen ontstaan die gedurende de gehele „open" tijd voortduren (na-impulsen). Daarentegen treden geen ruispiekjes op als de lichtflits wordt gedoofd vóór de impuls op de fotomultiplicator begint, zelfs al is de tussentijd slechts 10^{-7} sec. Dit blijkt uit de reeks oscillogrammen die in *fig. 9* is gereproduceerd; men ziet hier het signaal dat een multiplicatorbuis gedurende een impuls van 3 μsec geeft bij belichting met een lichtflits van 1 μsec, die juist voorafgaat aan de impuls op de multiplicatorbuis, of ten dele nog met deze samenvalt. Dank zij dit opmerkelijke gedrag van de fotomultiplicatorbuis hebben wij de beschreven impulstechniek in dit laboratorium in verschillende gevallen kunnen toepassen voor het detecteren van zeer zwak licht dat op een sterke lichtflits volgt, zoals voor het onderzoek van zwakke nalichtverschijnselen die door geabsorbeerd licht worden opgewekt, en ook in een soort optische radarapparatuur voor afstandsbepaling. Bij deze laatste wordt een sterke lichtflits op een ver verwijderd voorwerp (wolken of dergelijke) gericht en het tijdsverloop tot de aankomst van de zwakke gereflecteerde lichtflits gemeten. Hoewel de onvermijdelijke verstrooiing van de uitgezonden flits in de omgevende lucht een veel sterkere lichtintensiteit aan de fotomultiplicatorbuis opleverde dan de gereflecteerde flits, kon de laatste bij een looptijd van slechts 0,5 μsec reeds duidelijk worden aange-



92430

Fig. 9. Hetzelfde als in fig. 8, bij een impulsspanning van 2,0 kV, voor het geval dat een lichtflits van 1 μsec juist vóór de impuls of in het begin daarvan op de fotomultiplicatorbuis valt. In het eerste geval ziet men generlei na-impulsen verschijnen.

Het starten van de lichtflits wordt in het oscillogram zichtbaar doordat de spanningsstoot van 20 kV die de lichtbron voedt, een gedempte elektrische trilling op de afbuigplaten van de oscillograaf induceert. Het is opmerkelijk dat de werking van de fotomultiplicatorbuis zelf in het geheel niet door dergelijke inductieverschijnselen wordt beïnvloed. Hierdoor is de beschreven stroboscopische methode zeer geschikt om het inzetten en de stijgtijd van lichtflitsen (opbouwen van elektrische ontladingen) te bestuderen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

toond. De meting bleek nog mogelijk te zijn bij een intensiteitsverhouding van 10^5 tussen het verstrooide en het gereflecteerde licht.

Ten slotte nog een, niet principieel maar wel praktisch belangrijke, opmerking: bij voeding van de fotomultiplicatorbuis met impulsen worden veel geringere eisen gesteld aan de lichtdichte afsluiting van de buis en het eventueel verduisteren van de werkruimte, dank zij de geringe fractie van de tijd waarin de buis functioneert. Verder is de kans dat de buis bij blootstellen aan het daglicht beschadigd zou worden, veel geringer, aangezien de stroom zelfs bij de buitengewoon grote versterkingsfactoren die bij hoge spanningen optreden, geen zeer hoge gemiddelde waarde kan bereiken.

Schakeling voor het voeden van de fotomultiplicatorbuis met impulsen

Voor het opwekken van de vereiste impulsen en het regelen van hun faze hebben wij verschillende soorten schakelingen beproefd. *Fig. 10* toont een oplossing waarbij alleen normale buizen en onderdelen worden gebruikt. Het bovenste deel van de schakeling dient voor het ontsteken van de lichtbron, terwijl het onderste gedeelte de spanningsimpuls voor de fotomultiplicatorbuis produceert, die gewoonlijk een duur van 10^{-7} sec heeft en waarvan de topwaarde tussen 0 en 5000 V kan worden ingesteld. Beide gedeelten worden in werking gesteld door een gemeenschappelijke impulsgenerator *T*, die 1-10 000 impulsen per seconde kan leveren. De fazeverschuiving tussen de twee uitgangsimpulsen van de schakeling wordt geregeld door de potentiometer *Pot* en de trapsgewijs instelbare vertragingsleiding *D*. De tijdsduur van de spanningsimpuls voor de multiplicatorbuis wordt bepaald door de lengte van de coaxiale kabel *C*, die als impulsvormend netwerk fungeert.

Voor de stroboscopische waarneming met een „open" tijd van 10^{-7} sec moesten de fluctuaties in de onderlinge faze van lichtflits en multiplicatorimpuls tot minder dan 10^{-8} sec worden beperkt. Aan deze voorwaarde moest worden voldaan terwijl het tijdsverschil tussen de twee impulsen tussen 0 en 5 μsec gevarieerd moest kunnen worden. Dit was het moeilijkste probleem dat zich bij de beschreven experimenten voordeed; het kon alleen worden opgelost door veel aandacht te besteden aan ontkoppeling en afscherming en aan de stabilisatie van de voeding. In een gewijzigde schakeling, die later werd toegepast, werd voor de regeling van de faze gebruik gemaakt van een netwerk met continu instelbare vertragingstijd; hierdoor werden de fluctuaties sterk gereduceerd.

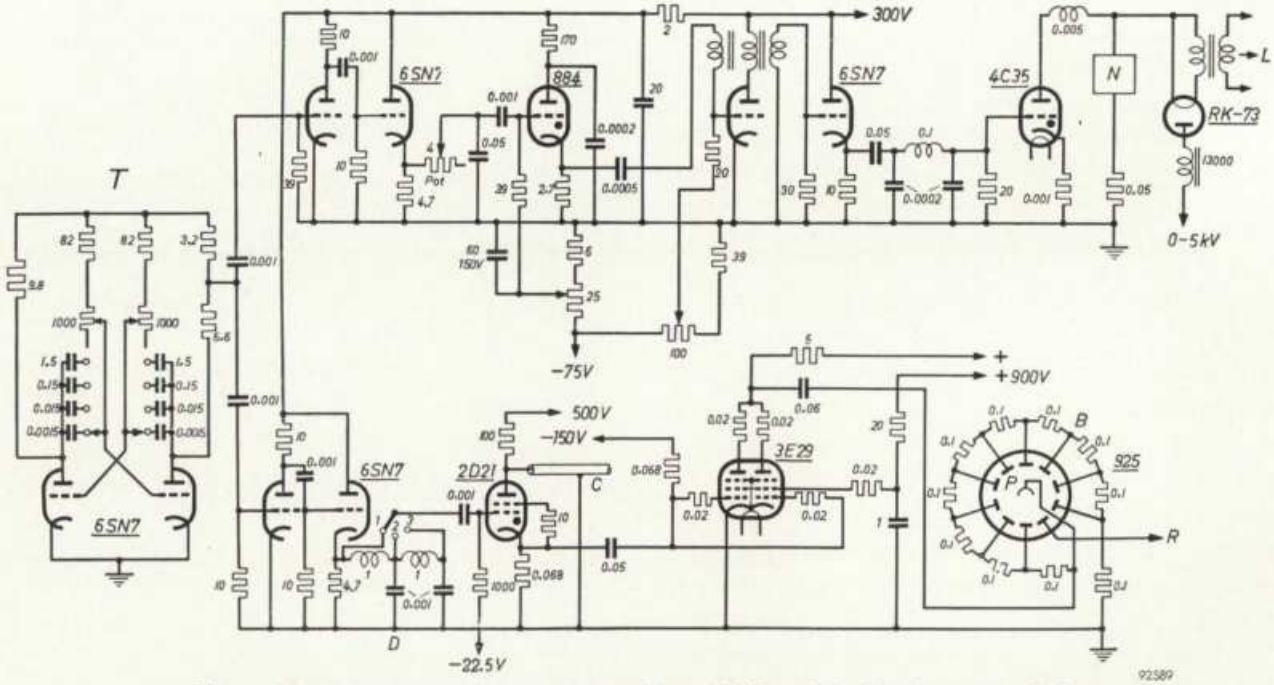


Fig. 10. Schakeling voor stroboscopie met een fotomultiplicatorbuis. Het bovenste gedeelte brengt de impuls voort die aan de lichtbron (*L*) wordt toegevoerd, het onderste gedeelte levert de vereiste spanningsimpuls (topwaarde 0-5000 V) voor de fotomultiplicatorbuis *P*. *T* gemeenschappelijke ontsteekgenerator; de potentiometer *Pot* en de in trappen regelbare vertragingsleiding *D* regelen de onderlinge faze van de lichtflits en de impuls op de multiplicatorbuis. De coaxiale kabel *C* bepaalt de tijdsduur van de impuls op de fotomultiplicatorbuis. *B* is de spanningsdeler voor de dynodes. Weerstandswaarden in kΩ, capaciteiten in μF, zelfinducties in mH.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De impuls voor de fotomultiplicatorbuis wordt capacitief overgebracht op de spanningsdeler B voor de dynodes (fig. 10), die bestaat uit tien koolweerstanden van 100 ohm. Dank zij deze lage impedantie kunnen de stijgtijd en afvaltijd van de dynodespanningen kort worden gehouden in vergelijking met de impulsduur van 10^{-7} sec. De normale buishouder met elf aansluitingen voor de fotomultiplicatorbuis bleek een zo grote capaciteit tussen de elektrodes te introduceren dat de impuls te sterk werd afgerond. De aansluitingen van de spanningsdeler werden daarom rechtstreeks met de doorvoerpennen van de fotomultiplicatorbuis verbonden, zoals in fig. 3 is te zien. Verwijderen van de buisvoet bracht geen verdere verbetering.

Er werden ook proeven gedaan waarbij slechts één of twee dynodes van de fotomultiplicatorbuis met een impulsspanning werden gevoed, terwijl de andere dynodes zich op een constante potentiaal overeenkomstig het normale gebruik met gelijkspanning bevonden. Bij deze werkwijze fungeert een van de dynodes als stuurrooster; hiermee kon echter de buis niet volledig worden afgeknepen, zoals voor de sluiterwerking vereist is; zelfs al liet men de spanning van de stuurdynode met een amplitude van verscheidene 100 V variëren, toch werd er voortdurend een signaal aan de uitgang verkregen.

Als stroommeter wordt een normaal in de handel verkrijgbare elektronische microamperemeter gebruikt, die zodanig werd gewijzigd dat hij zijn volle uitslag reeds bij stromen van 10^{-9} ampere kan geven, en die een voldoende uitgangsspanning levert voor aansluiting van een registreerinstrument (0-10 mV). Parallel op de ingang van de meter is een geschikte condensator aangesloten, waarvan de capaciteit tezamen met de ingangsimpedantie van de meter de gewenste tijdconstante RC voor de integratie van het signaal levert.

Gevoeligheid en nauwkeurigheid van de metingen

Blijkens verg. (1) beantwoordt een gemiddelde stroom van de fotomultiplicatorbuis van 10^{-9} A, bij een uersterkingsfactor $g = 10^9$ en een impulsherhalingsfrequentie f van b.v. 1000/sec, aan een waarde $\bar{n}_p \approx 0{,}006$, d.w.z. aan minder dan 1 fotoelektron per 100 „open" periodes van de multiplicatorbuis! Dat we signalen met zulke buitengewoon geringe intensiteit kunnen aantonen en met redelijke nauwkeurigheid meten, is te danken aan twee eigenschappen van de stroboscopische waarnemingsmethode, die kwalitatief reeds in de boven gegeven beschrijving tot uitdrukking kwamen: 1) Storende stroombijdragen, in hoofdzaak van thermische elektronen, die bij 300 °K ten getale van 10^5 per seconde optreden, worden vrijwel volkomen uitgeschakeld doordat de multiplicatorbuis telkens slechts zo kort open is: het gemiddelde aantal thermische elektronen per impuls is ongeveer $\bar{n}_t \approx 0{,}01$ (wederom 1 elektron per 100 „open" periodes van de multiplicatorbuis). 2) De fluctuaties van de te meten stroom worden sterk gereduceerd doordat het aantal per tijdseenheid arriverende foto-elektronen gemiddeld wordt over een zeer lange RC-tijd. De signaal-ruisverhouding S/N van de collectorstroom van de multiplicatorbuis wordt gegeven door de uitdrukking [8]):

$$\frac{S}{N} = \sqrt{\frac{\overline{g^2}}{\overline{g}^2} \frac{\bar{n}_p}{\bar{n}_p + \bar{n}_t}\, 2\,\bar{n}_p f RC}; \quad \ldots \quad (2)$$

hierbij is ook rekening gehouden met de fluctuaties van de versterkingsfactor g, die te wijten zijn aan fluctuaties in de secundaire emissie. In *fig. 11* is S/N uitgezet tegen $\bar{n}_p$, waarbij voor $\overline{g^2}/\overline{g}^2$ een waarde van 0,75 is aangenomen (deze waarde werd voor een bepaalde fotomultiplicatorbuis RCA 1P21 afgeleid door op foto's als in fig. 1 de hoogte van een groot aantal, door afzonderlijke elektronen teweeggebrachte, piekjes te meten). Uit de figuur leest men af dat men een signaal-ruisverhouding $S/N = 4$ kan verkrijgen met lichtflitsen die niet meer dan 1 fotoelektron per 1000 flitsen opleveren, mits men voor de stroboscopische waarneming de grootst mogelijke herhalingsfrequentie $f = 10^4$ per seconde en een RC-tijd van 10 seconden toepast.

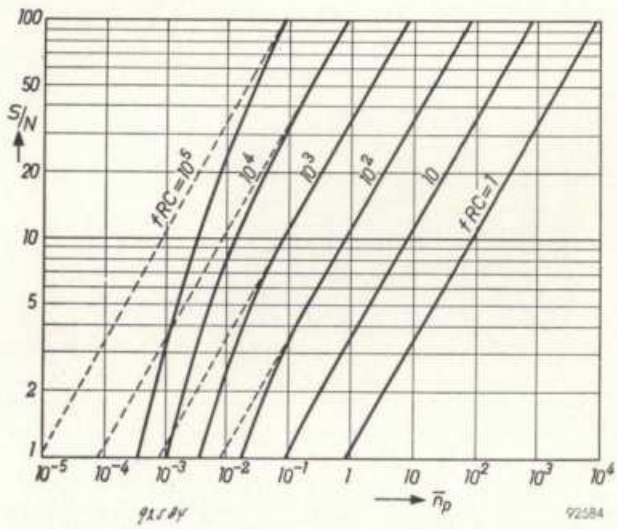


Fig. 11. Signaal-ruisverhouding S/N van de collectorstroom van de fotomultiplicatorbuis, uitgezet tegen het gemiddelde aantal $\bar{n}_p$ primaire foto-elektronen per impuls van de fotomultiplicatorbuis, voor verschillende impulsherhalingsfrequenties f en integratietijdconstanten RC (zie verg. 2). De gestippelde krommen zouden worden verkregen indien de fotokatode geen thermische elektronen uitzond.

[8]) Volgens een niet gepubliceerde afleiding door F. K. du Pré van dit laboratorium.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Aangezien de werkelijke „open" tijd van de fotomultiplicatorbuis gelijk is aan de tijdsduur van de spanningsimpuls op de dynodes verminderd met de totale looptijd van een elektronenlawine door de buis (enkele malen 10^{-8} sec), zal de spreiding in de looptijd, die enkele malen 10^{-9} sec kan bedragen, zich ten volle in de genoemde „open" tijd doen gevoelen. Deze spreiding zal derhalve uiteindelijk het scheidend vermogen van de stroboscopische aftasting beperken. Een praktische grens wordt aan het scheidend vermogen gesteld door de boven vermelde fluctuaties in de fazeverschuiving, die aan de schakeling inherent zijn. In fig. 4 ziet men dat bij de aftasting van een periodiek herhaalde lichtflits van 1 μsec met impulsen van 10^{-7} sec op de fotomultiplicatorbuis een scheidend vermogen verkregen werd van beter dan 3×10^{-8} sec (dit is de breedte op halve tophoogte van de eerste Hα-piek in fig. 4*a*).

Samenvatting. Het tijdsverloop van de lichtintensiteit van zwakke lichtflitsen kan worden onderzocht met behulp van een fotomultiplicatorbuis waarvan de dynodes met spanningsimpulsen worden gevoed. De buis werkt dan als een sluiter, waarvan de „open" tijd desgewenst 10^{-7} sec of nog minder kan bedragen. Wordt de lichtflits periodiek herhaald en synchroniseert men de impulsen op de fotomultiplicatorbuis hiermee in een constante fazeverhouding, dan kan elk interval (ter lengte van 10^{-7} sec) van de lichtflits afzonderlijk worden bekeken, en de momentele intensiteit hierin nauwkeurig worden gemeten, door de collectorstroom van de fotomultiplicatorbuis over een willekeurig lange tijd te integreren. Zelfs bij signalen die gemiddeld slechts een fractie van 1 foto-elektron per impuls opleveren, kan daarbij een grote signaal-ruisverhouding worden verkregen, aangezien de sluiterwerking van de met impulsen gevoede fotomultiplicatorbuis de thermische en andere storende stroombijdragen vrijwel volkomen onderdrukt. Er wordt een schakeling beschreven waarmee impulsen met een herhalingsfrequentie tot 10 000 per seconde kunnen worden verkregen en integratietijden van 10 sec of nog langer. De impuls van de fotomultiplicatorbuis ter lengte van 10^{-7} sec kan continu in faze over de gehele lichtflits (van b.v. 10^{-6} sec lengte) worden verschoven, zodat de lichtflits stroboscopisch kan worden onderzocht.

Bij voeding van de fotomultiplicatorbuis met impulsen mogen de dynodespanningen aanzienlijk hoger worden opgevoerd dan bij het werken met gelijkspanning; zodoende verkrijgt men een veel grotere inwendige versterkingsfactor (tot 10^9). Hierdoor wordt de meting van buitengewoon geringe lichtintensiteiten mogelijk, hetgeen b.v. van belang is voor spectraalanalytisch onderzoek. In dit artikel worden voorbeelden van op deze wijze opgenomen tijdafhankelijke spectrogrammen gegeven. Voorts worden enkele bijzonderheden van de werking van de met impulsen gevoede fotomultiplicatorbuis besproken en wordt er nader op de nauwkeurigheid van de metingen ingegaan. Het scheidend vermogen in de tijd kan beter dan 3×10^{-8} sec worden gemaakt door de fluctuaties in de fazeverschuiving tussen de lichtflitsen en de impulsen van de fotomultiplicatorbuis zoveel mogelijk te beperken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

VERBETERD FELSEN

621.981.6

Felsen is een bevestigingsmethode die in de fabricage van apparaten veelvuldig wordt toegepast. Het doel is, een mechanische verbinding tussen twee of meer onderdelen tot stand te brengen, b.v. tussen een bus, naaf of moer enerzijds (de felsbus) en één of meer platen of strippen anderzijds. De felsbus is daartoe voorzien van een cilindrische rand; nadat deze door een gat in de platen of strippen is gestoken, wordt hij met behulp van speciaal gereedschap — de felsnippel — volledig buitenwaarts omgebogen („gefelst".) Daarmee is de verbinding voltooid. In *fig. 1* is de gang van zaken verduidelijkt.

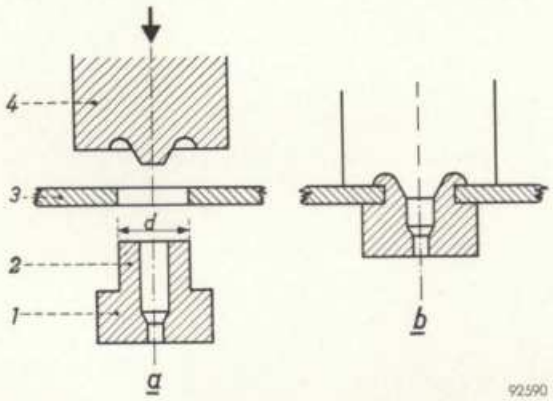


Fig. 1. *a*) *1* felsbus (met felsrand *2*), *3* plaat waaraan de felsbus bevestigd moet worden, en *4* het felsgereedschap (felsnippel). *b*) Door de felsnippel en de felsbus voldoende sterk op elkaar te drukken, brengt men de felsverbinding tot stand.

De felsbewerking zelf kan worden uitgevoerd op twee manieren: „drukkend" of „roterend". *Fig. 2* toont de hiervoor nodige gereedschappen. Bij het roterend felsen laat men de nippel draaien met een snelheid van enige honderden omwentelingen per minuut. De drukkracht mag hier kleiner zijn dan bij het drukkend felsen, wat van belang is bij bros materiaal (keramiek, plastiek), maar het roterend felsen vergt iets meer tijd.

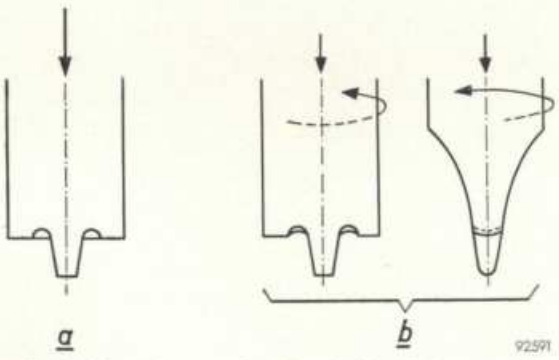


Fig. 2. *a*) Nippel voor „drukkend felsen" (omwentelingslichaam). *b*) Nippel voor „roterend felsen", van voren en van opzij gezien.

De eisen die men aan een felsverbinding stelt, hebben betrekking op de mechanische sterkte en op het uiterlijk. Bij de praktische uitvoering van het felsen dreigt zowel aan de sterkte als aan het uiterlijk afbreuk te worden gedaan door het optreden van scheuren in de felsrand. (Corrosie kan een tweede oorzaak zijn, maar deze blijft hier verder buiten beschouwing.)

De felsbussen worden door verspaning vervaardigd uit staafvormig staal, messing of aluminium. Deze materialen zijn alleen goed verspaanbaar na een zekere versteviging, welke men kan doen ontstaan door koude vervorming.

De versteviging echter vermindert de plastische vervormbaarheid en vergroot dus de kans op scheurtjes in de felsrand. Daarom heft men de versteviging — en daarmee de achteruitgang van de plastische rek — bij de gedraaide felsbussen weer op door ze te onderwerpen aan een voorbehandeling, bestaande in een bepaald gloeiproces. Dikwijls zal dit opheffen van de versteviging (waarbij de inwendige spanningen verdwijnen) aanleiding geven tot vervorming van de felsbussen. Komen de afmetingen er nauwkeurig op aan, dan is derhalve ook nog een verdere bewerking nodig, zoals slijpen of ruimen. De kosten verbonden aan deze voorbehandelingen zijn voor het Metallurgisch Laboratorium van de Apparatenfabriek te Eindhoven aanleiding geweest tot het zoeken naar een andere oplossing.

Het ontstaan van scheuren tijdens het felsen is niet verwonderlijk als men weet in welk een mate de felsrand plastisch wordt vervormd. Voor een felsrand met een middellijn $d = 4$ mm (fig. 1*a*) treden in het punt A (*fig. 3*) een radiale stuik van ca. 15% en een tangentiële rek van ca. 25% op, in het punt B zelfs een radiale rek van ca. 70% en een tangentiële rek van ca. 100%. Dat het materiaal een volgens normale maatstaven zeer grote plastische vervorming kan verdragen, is te danken aan het feit dat tijdens de felsbewerking drukcomponenten worden geïntroduceerd die loodrecht op de trekspanningen staan. (Een analoge toestand komt voor bij vervormingsprocessen zoals walsen en klinken.)

De oplossing is dan ook in de eerste plaats gezocht in een zodanige vormgeving van felsbus en gereedschap dat de tangentiële trek kleiner werd en tegelijk de druk in richtingen loodrecht op deze

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

trek groter. Dit wil zeggen dat het materiaal van de felsrand „meer opgesloten gehouden" moest worden. Daartoe werd het profiel van de felsnippel

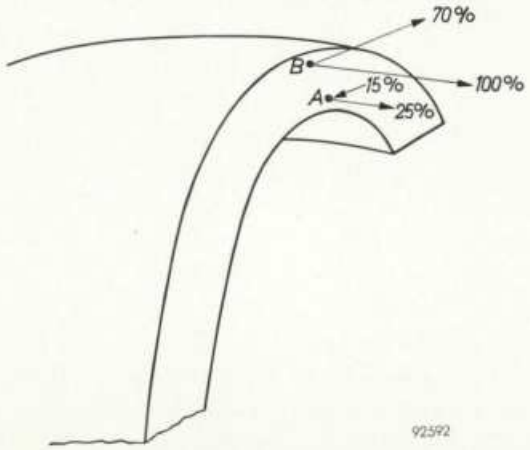


Fig. 3. Doorsnede van een gefelste rand van het oude model; uitwendige diameter (vóór het omfelsen) 4 mm. In *A* treden een radiale stuik van ca. 15% en een tangentiële rek van ca. 25% op, in *B* een radiale rek van ca. 70% en een tangentiële rek van ca. 100%.

gewijzigd; experimenteel is ten slotte de in *fig. 4* weergegeven vorm de beste gebleken. Tevens bleek het gunstig, de felsrand iets dikker te maken dan voorheen. In dit onderzoek werden niet alleen dimensioneringskwesties betrokken, maar ook ver-

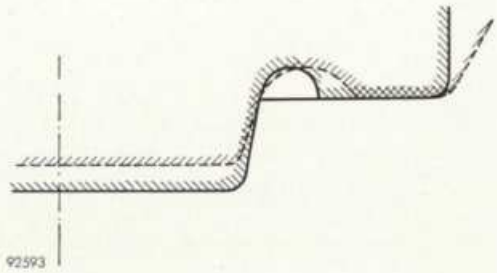


Fig. 4. Oud profiel (gestippeld) en nieuw profiel (getrokken) van de felsnippel.

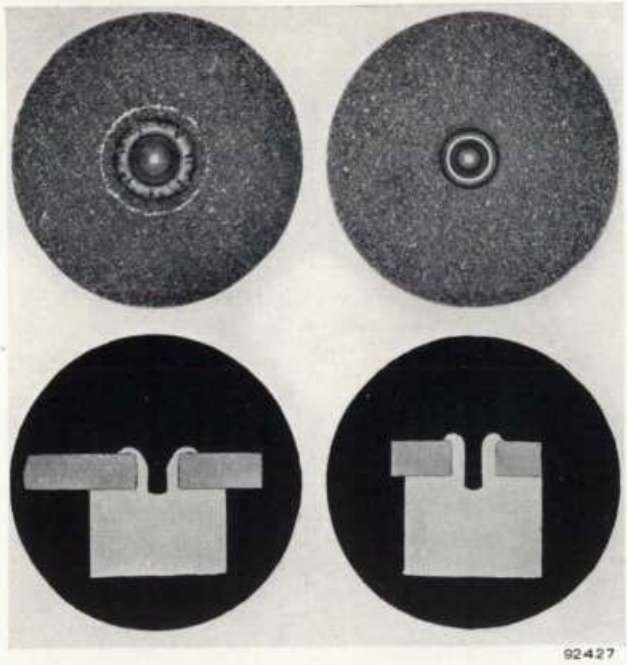


Fig. 5. Felsverbindingen, van boven gezien en in doorsnede. Materiaal: messing. Vergroting: 3×. *Links:* felsverbinding zoals ze vóór het onderzoek werd gemaakt, en die veelal moest worden afgekeurd wegens randscheurtjes. *Rechts:* reproduceerbaar te maken felsverbinding volgens de resultaten van het onderzoek.

schillende soorten materiaal en verschillende smeermiddelen; verder werden de gunstigste duur van het felsen bepaald en, bij roterend felsen, het gunstigste toerental. Dit alles is geschied volgens een uitvoerig, statistisch verantwoord, proevenprogramma [1]).

Het resultaat is geweest een aanzienlijke verbetering in het uiterlijk van de felsverbindingen — zoals in *fig. 5* is gedemonstreerd — en in de sterkte ervan, terwijl voorbehandelingen overbodig zijn geworden.

H. E. DEELMAN.

[1]) H. E. Deelman, Sigma **3**, 26-29, 1957 (no. 2).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLIKATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publikaties, voor zover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven, op aanvrage overdrukken.

2429: J. H. Stuy: Studies on the mechanism of radiation inactivation of micro-organisms, III. Inactivation of germinating spores of Bacillus cereus (Biochim. biophys. Acta **22**, 241-246, 1956, no. 2).

Vervolg van **2274** en **2428**. Gedurende het kiemproces in het eerder genoemde synthetische medium verloren de sporen geleidelijk hun resistentie tegen verhitting, röntgenstralen en ultraviolette stralen. Deze verschijnselen werden aan een gedetailleerd onderzoek onderworpen. Hierbij bleek dat de resistentie tegen blootstelling aan een temperatuur van 70 °C gedurende 10 minuten, als functie van de verblijfsduur in het synthetische medium (de kiemtijd), zeer snel afnam. De resistentie tegen röntgenstralen vertoonde hetzelfde beeld. De resistentie tegen ultraviolette stralen nam echter aanzienlijk toe gedurende de eerste minuut van de kiemtijd, om daarna eveneens snel af te nemen. Zien we af van de toeneming van de resistentie tegen ultraviolette straling gedurende de eerste minuut van het kiemen, dan leidt het overeenkomstige verloop van de afneming der genoemde resistenties tot de onderstelling dat hetzelfde mechanisme hiervoor verantwoordelijk is. Het opnemen van water door de sporen staat met dit mechanisme waarschijnlijk in nauw verband.

2430: H. B. Haanstra: Einige Bemerkungen über die Polystyrol-SiO-Abdruckmethode (Rev. univ. Mines **99**, 481-485, 1956, no. 10).

Het blijkt dat opnamen, gemaakt met de elektronenmicroscoop, van replica's vervaardigd volgens de polystyreen-SiO-methode, bepaalde eigenaardigheden vertonen die niet verenigbaar zijn met de opvatting dat het SiO-laagje overal dezelfde dikte heeft. Zo kunnen gedeelten die zeker niet loodrecht op de elektronenstraal staan, niettemin in de foto de grootste helderheid vertonen. Neemt men aan dat het SiO-laagje geen constante dikte heeft — wat heel goed kan optreden —, dan kan men de bedoelde eigenaardigheden verklaren.

2431: J. B. de Boer en W. Morass: Berechnung der Sehweite aus der Lichtverteilung von Automobilscheinwerfern (Lichttechnik **8**, 433-437, 1956, no. 10).

Door V. J. Jehu is, gedeeltelijk langs experimentele, gedeeltelijk langs theoretische weg, een methode uitgewerkt, om, uitgaande van de lichtverdelingsdiagrammen van autokoplantaarns, de afstand te berekenen waarop obstakels op de weg zichtbaar worden (de zichtbaarheidsafstand) voor een automobilist wiens wagen met deze koplantaarns is uitgerust. Bij deze methode wordt met de verblinding door een tegenligger rekening gehouden. De uitkomsten blijken echter niet steeds in overeenstemming met de praktijk. De auteurs hebben daarom uitvoerige nieuwe proeven gedaan over zichtbaarheid op de weg onder rijcondities. Met behulp van de resultaten dezer proeven kan men de zichtbaarheidsafstand langs grafische weg bepalen. Deze bepalingen leveren de mogelijkheid, op eenvoudige wijze de kwaliteit van koplantaarns te vergelijken op grond van hun lichtverdelingsdiagrammen.

2432: J. de Jonge en H. J. van den Bergh: The preparation of 2,4,6-trimethoxymethyl phenol (Rec. Trav. chim. Pays-Bas **75**, 1214, 1956, no. 9-10).

Beschrijving van de bereiding van 2,4,6-trimethoxymethylfenol.

2433: P. Jongenburger: De invloed van dislocaties op enige fysische eigenschappen van vaste stoffen (Ned. T. Natuurk. **22**, 297-305, 1956, no. 10).

In deze voordracht, gehouden op het symposium „Dislocaties in vaste stoffen" van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging op 6 januari 1956, werd een overzicht gegeven van de invloed die dislocaties in metalen (speciaal in koper) hebben op de elektrische weerstand en op de verhoging van de elektrische weerstand in een magneetveld. Ook de invloed op de kernspinresonantie werd besproken. Dit is een effect dat men ook aan niet-geleidende kristallen kan bestuderen. Meting van de genoemde invloeden levert een vrij goed middel om de concentratie van de dislocaties te bepalen.

2434: J. I. de Jong, R. Dijkstra en J. de Jonge: The ortho/para distribution of methylol groups in the reaction of phenol and formaldehyde, I (Rec. Trav. chim. Pays-Bas **75**, 1289-1302, 1956, no. 9-10).

Het eerste gedeelte van dit artikel bevat een beschrijving van een colorimetrische bepalingsmethode

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van fenol en van fenolderivaten. In het tweede gedeelte wordt uiteengezet hoe deze methode kan worden gebruikt om de verhouding te bepalen van de hoeveelheden ortho- en paramethylol gevormd bij de reactie tussen fenol en formaldehyde. Het blijkt dat deze verhouding ongeveer 58 : 42 is als de reactie geschiedt in water van 90 °C en bij een p_H van 5,5-6,5.

2435: D. Kleis: Toepassing en opstelling van luidsprekers in geluidsinstallaties (T. Ned. Radiogenootschap **21**, 237-254, 1956, no. 5).

Al naar de toepassing worden aan luidsprekers en hun opstelling verschillende eisen gesteld. De auteur bespreekt eerst de bundeling van de geluidsuitstraling bij verschillende luidsprekertypen en groepen van luidsprekers (luidsprekerzuilen). Vervolgens behandelt hij de opstelling der luidsprekers voor de weergave van spraak in de open lucht en in besloten ruimten, speciaal in te sterk galmende zalen. Daarna komt de muziekweergave in te sterk dempende zalen ter sprake, waarbij ook de mogelijkheid van kunstmatige nagalm (stereo-nagalm) wordt genoemd. Wat betreft muziekweergave in de huiskamer, worden de voordelen van twee geluidskanalen besproken, die, hetzij voor stereofonie, hetzij voor verbetering van de akoestiek van de huiskamer voor muziekweergave (concertzaalakoestiek) kunnen worden benut. De auteur wijst op de gunstige mogelijkheden die hier liggen voor de draadomroep. Als middelen om de muziekweergave met een enkel geluidskanaal in de huiskamer te verbeteren (grammofoon- en radioweergave), komen het gebruik van dubbelconusluidsprekers, het gebruik van verscheidene, onder hoeken in het ontvangtoestel geplaatste, luidsprekers, en, als beste oplossing, het gebruik van verspreid in de kamer opgestelde luidsprekers in aanmerking. Ook in high-fidelity-weergeefinstallaties wordt dit laatste toegepast. Ten slotte worden enige opmerkingen gemaakt over geluidsweergave in bioscopen.

2436: J. H. Stuy: Studies on the radiation inactivation of micro-organisms, IV. Photoreactivation of the intermediate stages in the transformation of Bacillus cereus spores into vegetative cells (Antonie van Leeuwenhoek **22**, 337-349, 1956, no. 4).

Vervolg van **2274**, **2428** en **2429**. Nadat geconstateerd was dat bacteriën van de soort Bacillus cereus wel fotoheractivering vertonen maar de sporen niet, werd onderzocht gedurende welk stadium van de ontwikkeling van spore tot vegetatieve cel (d.i. de volwassen bacterie) de mogelijkheid van fotoheractivering begint op te treden. Het bleek dat men op zijn minst vijf ontwikkelingsstadia kan onderscheiden; elk dezer stadia kon worden geïsoleerd en bestudeerd. De eerste verschijnselen van heractivering werden waargenomen gedurende de ontwikkeling van het tweede naar het derde stadium. De waarnemingen wekken sterk de indruk dat de onmogelijkheid van fotoheractivering der niet of slechts tot het tweede stadium gekiemde sporen te wijten is aan de tot dan toe vrijwel volledige afwezigheid van stofwisseling.

2437: M. G. van der Steeg en K. J. de Vos: Reversibility of the coercive force in alnico 5 (J. appl. Phys. **27**, 1250, 1956, no. 10).

Voorlopige mededeling over de ontdekking met behulp van röntgenstralen van een nieuwe faze, met een vlakkengecenterde kubische kristalstructuur, in Fe-Co-Ni-Al-magneetlegeringen. De nieuwe faze is waargenomen na zeer langdurig gloeien (70 dagen) van de legering bij 600 °C. Zoals bekend is, kan een faze die begint zich te vormen reeds aanzienlijke invloed uitoefenen op bepaalde fysische eigenschappen, lang voordat zij röntgenografisch aantoonbaar is. Magnetische metingen, uitgevoerd na veel kortere gloeitijden, doen vermoeden dat de nieuw ontdekte faze een belangrijke rol speelt bij het tot stand komen van de grote coërcitiefkracht van de genoemde magneetlegeringen.

2438: L. J. van der Pauw en D. Polder: The photo-thermoelectric phenomenon in semiconductors (J. Electronics **2**, 239-240, 1956, no. 3).

Het foto-thermo-elektrische effect is het verschijnsel dat de thermospanning tussen twee halfgeleidende stoffen verandert wanneer een der stoffen wordt belicht. Voor de sterkte van dit effect is door Tauc een uitdrukking afgeleid waarbij hij ervan uitging dat het energieverschil tussen de geleidings- en de valentieband onafhankelijk is van de temperatuur en dat hetzelfde geldt voor de beweeglijkheden van de elektronen en van de gaten. De auteurs brengen de afhankelijkheid der genoemde grootheden van de temperatuur wel in rekening; dit levert een correctie die van dezelfde orde van grootte is als het door Tauc berekende effect.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!